Introducción

Antes de meternos de lleno en cada uno de los temas, haremos una breve introducción al campo digital.

Es absolutamente evidente que la tecnología de audio digital ha cambiado la manera en que se producen, reúnen y distribuyen todas las formas de medios de comunicación. En las últimas décadas, se desarrolló drásticamente la forma en que los productores de música e ingenieros de grabación manipulan y distribuyen el audio digital. Ello ha sido posible gracias al avance vertiginoso de la microelectrónica y su aplicación a la producción de dispositivos poderosos y complejos capaces de manejar y transformar cada vez más con mayor precisión y rapidez la enorme cantidad de información contenida en el sonido.

Aunque audio digital es un variado y complejo campo de estudio, la teoría básica detrás de las cortinas de la magia no es tan difícil de entender. En su nivel más elemental, es simplemente un proceso por el cual las representaciones numéricas de señales analógicas (en forma de niveles de voltaje) se codifican , procesan , almacenan y reproducen con el tiempo a través del uso de un sistema de números binarios.

Al igual que los seres humanos de habla Español que se comunican mediante la combinación de cualquiera de las 27 letras juntas dentro de grupos conocidos como " palabras" y manipulan números utilizando el sistema decimal (base 10), el sistema de elección para los dispositivos digitales es el binario (base 2). Este sistema numérico proporciona un medio rápido y eficaz para manipular y almacenar datos digitales . De esta manera un ordenador o microprocesador puede realizar cálculos y tareas que de otro modo sería engorroso y menos rentables y / o directamente imposible llevar a cabo en el dominio analógico .

Para dar un ejemplo, vamos a echar un vistazo a cómo una construcción humana puede traducirse en un lenguaje digital (y viceversa) . Si escribimos las letras C , A y T en un procesador de textos, el equipo va a ir rápidamente a la tarea de traducir esas pulsaciones de teclado en una serie de palabras digitales de 8 bits representadas como [0100 0011], [01000001] y [0101 0100].

De una manera similar , un sistema de audio digital funciona por muestreo (medición, mensurado) del nivel de tensión instantánea de una señal analógica a intervalos específicos a través del tiempo, y luego convierte estas muestras en una serie de “palabras codificadas” que digitalmente representan los niveles de voltaje analógicos. Mediante la medición de los cambios sucesivamente en el nivel de voltaje de una señal analógica (en el tiempo), esta corriente de palabras representativas pueden ser almacenadas en una forma que constituye la señal analógica original. Una vez almacenados, los datos pueden ser procesados y se reproducen de manera que han cambiado la producción de audio para siempre.

Numeración binaria

Dado que todos los sistemas digitales se basan en la numeración binaria, antes de comenzar a describir los procesos básicos de muestreo y digitalización del sonido nos referiremos brevemente a esa numeración. En la numeración decimal (el sistema que empleamos habitualmente), se utilizan diez símbolos (los dígitos 0, 1, 2, ..., 9) en un sistema posicional para representar las sucesivas cantidades. Esto significa que cada nueva cifra que se agrega tiene un peso 10 veces mayor que la que se

Conversión del sistema binario al decimal.
Los ceros ubicados a la izquierda son opcionales.

Decimal	Binario
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110
15	1111

encuentra a su derecha.

Por ejemplo,

$$27 = 2 \times 10 + 7 \ ,$$

$$306 = 3 \times 10^2 + 0 \times 10 + 6 \ .$$

En la numeración binaria, se utilizan sólo dos símbolos (los dígitos 0 y 1), también en un sistema posicional, sólo que ahora cada nueva cifra tiene un peso sólo 2 veces mayor que la anterior. Por ejemplo,

$$101 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2 + 1 \equiv 5 \ ,$$

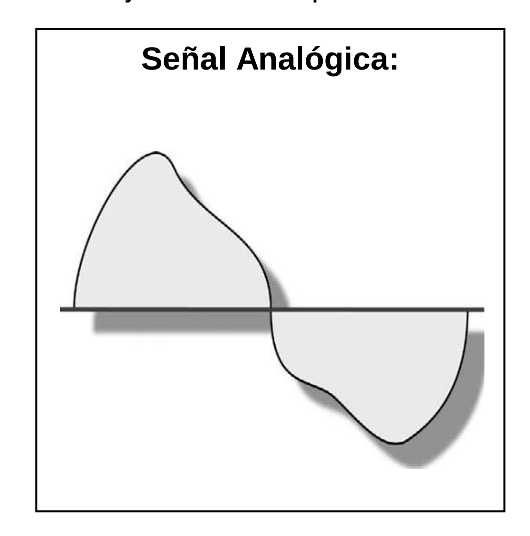
$$11011 = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2 + 1 \equiv 27 \ .$$

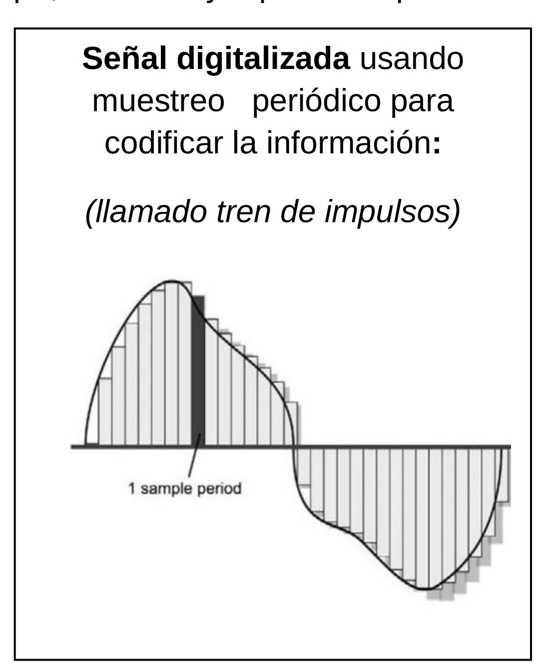
En esta numeración, el 1 tiene características similares al 9 del sistema decimal, es decir, una vez que llegamos al 1 debemos agregar una nueva cifra 1 y cambiar la primera por 0. En la Tabla 15.1 se muestra la conversión de decimal a binario para los números del 0 al 15. La razón por la que se utilizan los números binarios es porque eléctricamente es muy fácil codificar los 0's y los 1's. Basta utilizar un nivel de tensión alto (5 V) para un 1 y un nivel de tensión bajo (0 V) para un 0. Esto hace que la representación sea extremadamente insensible al ruido. En efecto, la señal seguiría siendo recuperable aún en presencia de un ruido de 2 V, que corresponde a una relación señal/ruido tan baja como 20 log 5/2 = 8 dB (inadmisible si el sistema fuera analógico).

Muestreo

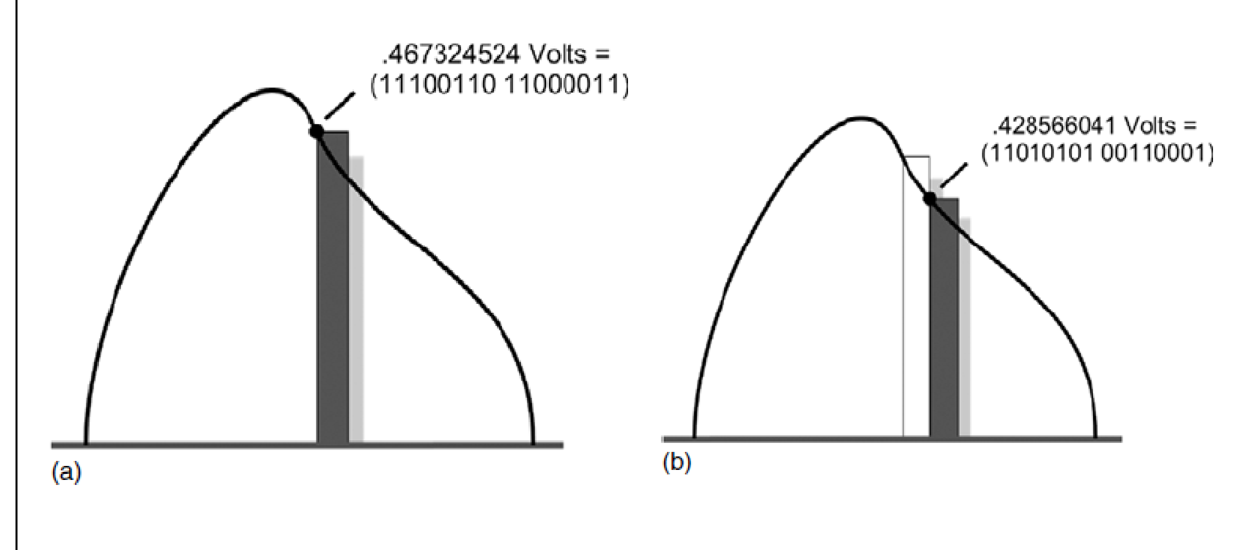
En el mundo de audio analógico, las señales son registradas, almacenadas y reproducidas como cambios de niveles de voltaje que varían continuamente en el tiempo.

Por otra parte, el proceso de grabación digital no funciona de la misma manera, sino más bien, trabaja tomando muestras periódicas de una forma de onda de audio analógico con el tiempo, y después calcula cada una de estas muestras instantáneas dentro de grupos binarios que representan digitalmente estos niveles de voltaje a medida que cambian con el tiempo, con la mayor precisión posible.





El proceso de muestreo. (a) La señal analógica es momentáneamente "retenida" (congelada en el tiempo), mientras que el convertidor determina el nivel de tensión en ese punto en el tiempo y luego convierte ese nivel en código binario que es numéricamente equivalente al nivel de voltaje de la señal analógica original. **(b)** Una vez que esta información digital es procesada y almacenada, la muestra se libera y la muestra siguiente se realiza, de esta forma el sistema va de nuevo a la tarea de determinar el nivel de la siguiente tensión muestreada ... y así sucesivamente, y así sucesivamente, y así sucesivamente durante la duración de la grabación.



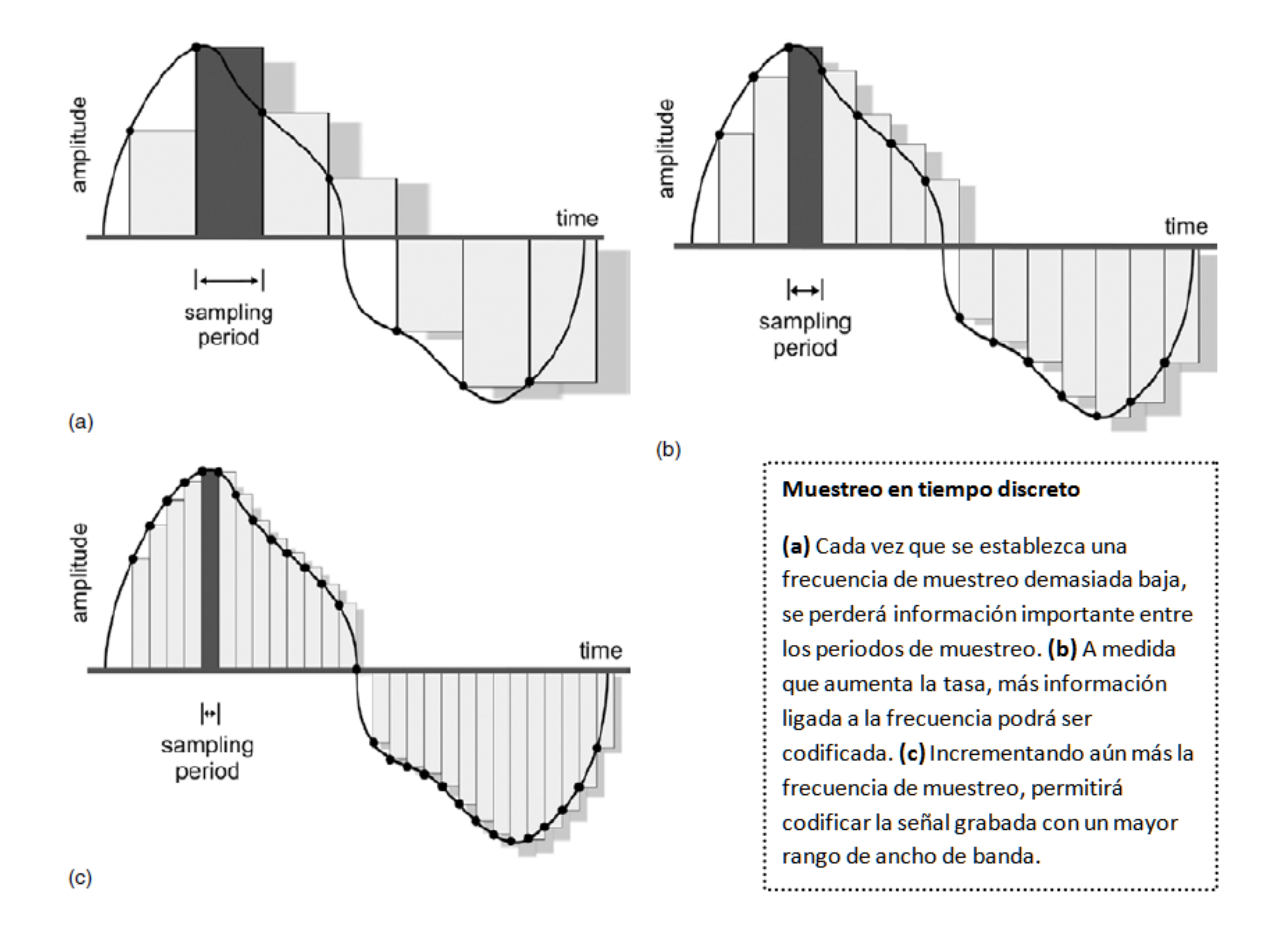
Dentro de un sistema de audio digital, la **frecuencia de muestreo o tasa de muestreo (F_M)** se define como el número de medidas (muestras) que se toman periódicamente en el transcurso de un segundo.

Recíprocamente, **periodo de muestreo (T_M)** es el tiempo transcurrido entre cada periodo de muestreo. Por ejemplo, una velocidad de muestreo de 44.1 kHz corresponde a una tasa de muestreo de 1/44.100 por segundo.

Por ello:

$$f_M = \frac{1}{T_M}$$

Este proceso puede compararse a un fotógrafo que lleva una serie tomas consecutivas, para luego verlas plasmadas en una animación. Cuando el número de fotografías tomadas en un segundo aumenta, la exactitud del evento capturado, por su parte, aumentará hasta que la resolución podrá volverse continua y convincente (si se quiere).



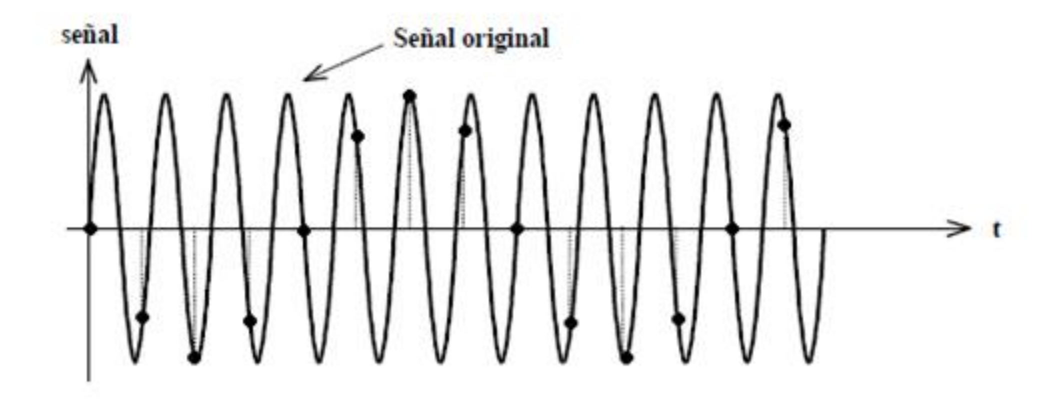
Muestreo en tiempo discreto

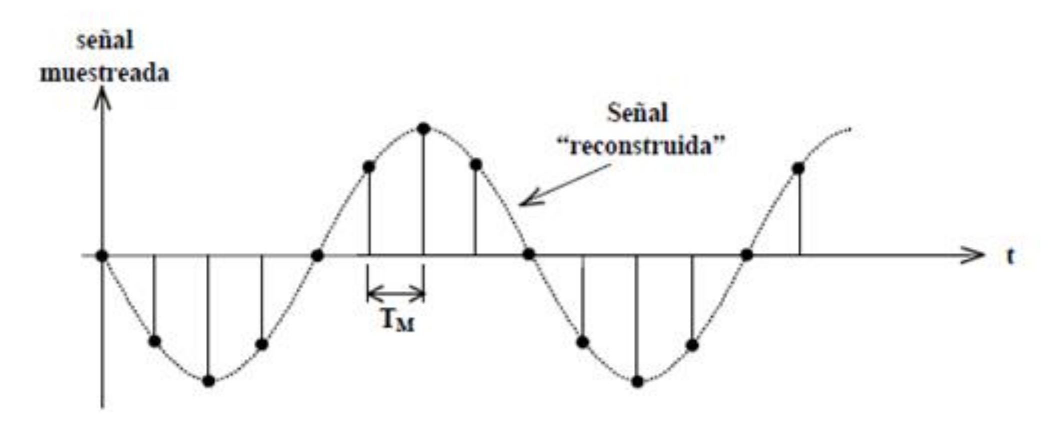
(a) Cada vez que se establezca una frecuencia de muestreo demasiada baja, se perderá información importante entre los periodos de muestreo. **(b)** A medida que aumenta la tasa, más información ligada a la frecuencia podrá ser codificada. **(c)** Incrementando aún más la frecuencia de muestreo, permitirá codificar la señal grabada con un mayor rango de ancho de banda.

Es intuitivamente evidente que la frecuencia de muestreo debe ser bastante alta, ya que entonces se logra un grado de detalle mayor. Existe un criterio que debe cumplirse obligatoriamente en todo proceso de muestreo, "la frecuencia de muestreo debe ser mayor que el doble de la máxima frecuencia presente en la señal", ese es el **teorema de Nyquist**, también llamado teorema del muestreo.

$$f_M > 2f_{máx}$$

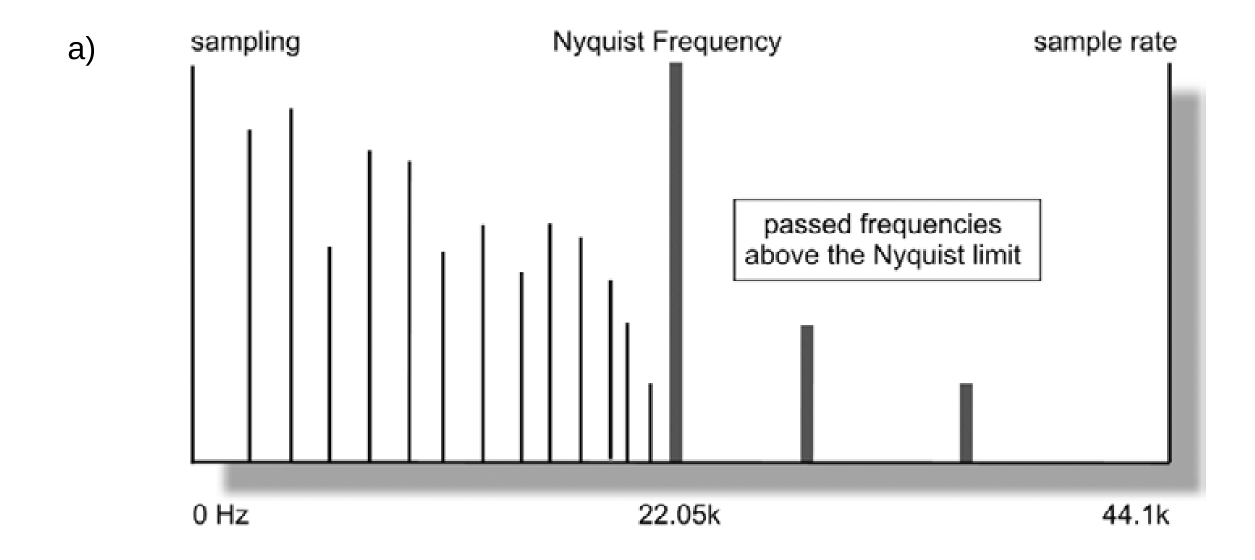
Este teorema no se refiere sólo a la máxima frecuencia de interés sino a la máxima frecuencia que efectivamente aparece en la señal al muestrear, y de no respetarlo, acarrea con sigo la aparición de componentes de frecuencia espurias en la banda útil (dentro del rango audible). Se utiliza para ello un filtro pasabajos de pendiente muy abrupta en la banda de corte (96 dB/octava o más), denominado **filtro antialias** (antialiasing filter) para explicarlo ilustraremos.

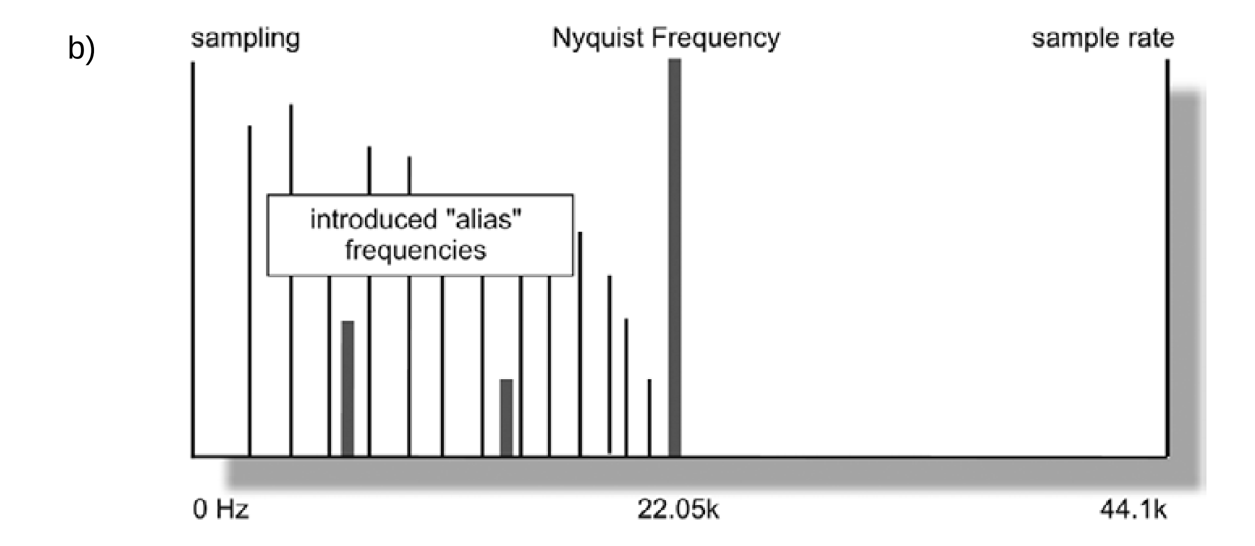




*Efecto del muestreo con una frecuencia menor que el doble de la máxima frecuencia contenida en la señal. Una señal de **35 kHz** se muestrea con una frecuencia de **40 kHz**; al intentar reconstruirla, aparece una **frecuencia alias** de **5 kHz***

Las frecuencias que entran al proceso de digitalización por encima del límite que establece el teorema de muestreo, podrán introducir distorsión armónica. **(a)** existen frecuencias por encima que el doble (2x) de la tasa de muestreo elegida. **(b)** ello produce frecuencias espurias (alias) que se introducen dentro del rango audible como distorsión.





Otro aspecto al que debemos tomar con cautela, es que los filtros antialias no son del todo inofensivos para la señal dentro de la banda de paso, y ello puede ser un inconveniente. Aunque el filtro afecte sólo imperceptiblemente la amplitud de la señal en dicha banda, afecta de un modo apreciable la fase, lo cual puede alterar la imagen estéreo.

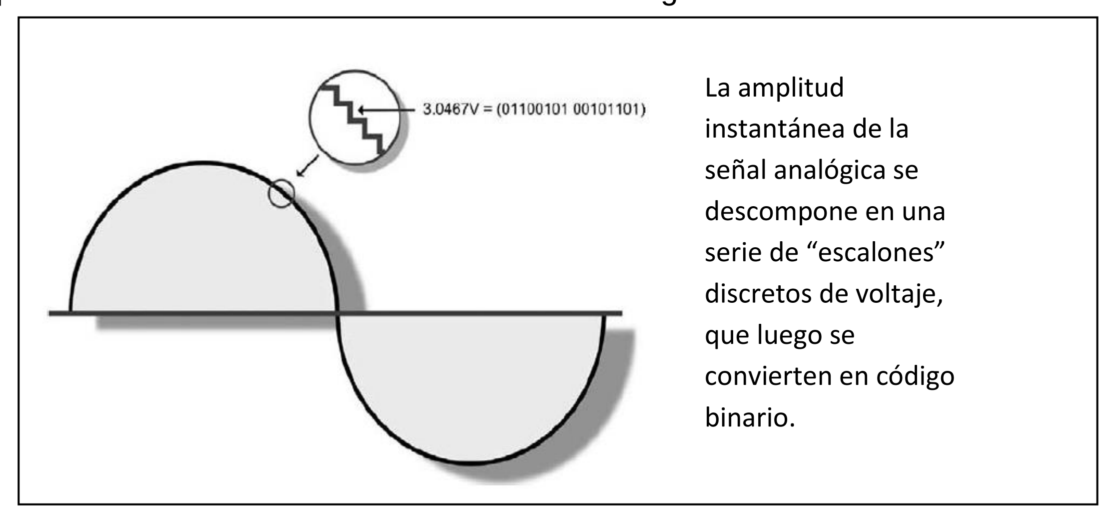
A modo de conclusión, Federico Miyara sostiene que **muestrear una señal** significa "reemplazar la señal original por una serie de muestras tomadas a intervalos regulares"

Cuantización

La cuantización propiamente dicha, representa dentro del proceso de conversión analógica/digital la componente ligada a la **amplitud** de la señal de audio.

Es usada para traducir los niveles de voltaje de una señal analógica continua (en puntos de muestreo discretos en el tiempo) a dígitos binarios (bits), con el fin de almacenar o manipular datos en el dominio digital.

Mediante el muestreo de la amplitud de una señal analógica a intervalos precisos en el tiempo, el convertidor determina el nivel de tensión exacta de la señal (durante un intervalo de muestra, cuando se mantiene momentáneamente el nivel de tensión), y a continuación emite el nivel de la señal como un conjunto equivalente de números binarios (agrupados en profundidad de n-bits), representando el nivel de tensión muestreada originalmente.



La amplitud instantánea de la señal analógica se descompone en una serie de "escalones" discretos de voltaje, que luego se convierten en código binario.

El código resultante es usado para codificar el nivel de voltaje original con el mayor grado de precisión posible, determinado por la profundidad de bits elegida y el diseño global del sistema.

Hoy en día, las computadoras y los dispositivos de procesamiento de señales son capaces de realizar cálculos internos a 32 y 64 bits de resolución. Este espacio libre interno añadido a nivel de bits ayuda a reducir los errores y aumentar el rendimiento en bajas resoluciones cuando múltiples corrientes de datos de audio se mezclan y procesan en un sistema de procesamiento digital de señales (**DSP** *digital signal processing*). Esta mayor resolución interna de bits se utiliza para reducir los errores que pueden al acumularse dentro del bit menos significativo (LSB , el valor numérico final y más pequeño dentro de un código digital) . Como múltiples señales se mezclan y se multiplican (algo habitual en el cambio de ganancia y las funciones de procesamiento) , los números de bits de resolución inferior juegan un papel más importante en la determinación de la precisión y la distorsión global de la señal. Entonces si la profundidad de bits internos es mayor, estas resoluciones pueden dar como resultado final una corriente de datos que está relativamente libre de errores . Esto nos lleva a la conclusión de que una mayor longitud de código a menudo se traduce directamente en una mayor resolución (y , dentro de lo razonable , sin duda de mayor calidad), debido al número agregado de pasos finitos en el que una señal puede ser codificada digitalmente. A continuación se detallan los pasos o “escalones” que son introducidos en el proceso ADC con las tasas de cuantización más frecuentes:

DSP

El **procesamiento digital de señales** o DSP (sigla en inglés de **digital signal processing**) es la manipulación matemática de una señal de información para modificarla en algún sentido. Es una de las más potentes tecnologías que dieron forma a la ciencia e ingeniería en el siglo XXI. Este está caracterizado por la representación en el dominio del tiempo discreto, en el dominio frecuencia discreta, u otro dominio discreto de señales por medio de una secuencia de números o símbolos y el procesado de esas señales. Los cambios revolucionarios que ya se han repercutido en una amplia gama de campos: las comunicaciones, imágenes médicas, radar y sonar, la reproducción de música de alta fidelidad, así como la prospección de petróleo, por nombrar sólo algunos. Cada una de estas áreas se ha desarrollado una tecnología DSP de profundidad, con sus propios algoritmos, matemáticas y técnicas especializadas.

8-bit = (nnnnnnnn) = 256 pasos o “escalones”

16-bit = (nnnnnnnn nnnnnnnn) = 65,536 pasos o “escalones”

20-bit = (nnnnnnnn nnnnnnnn nnnn) = 1,048,576 pasos o “escalones”

24-bit = (nnnnnnnn nnnnnnnn nnnnnnnn) = 16,777,216 pasos o “escalones”

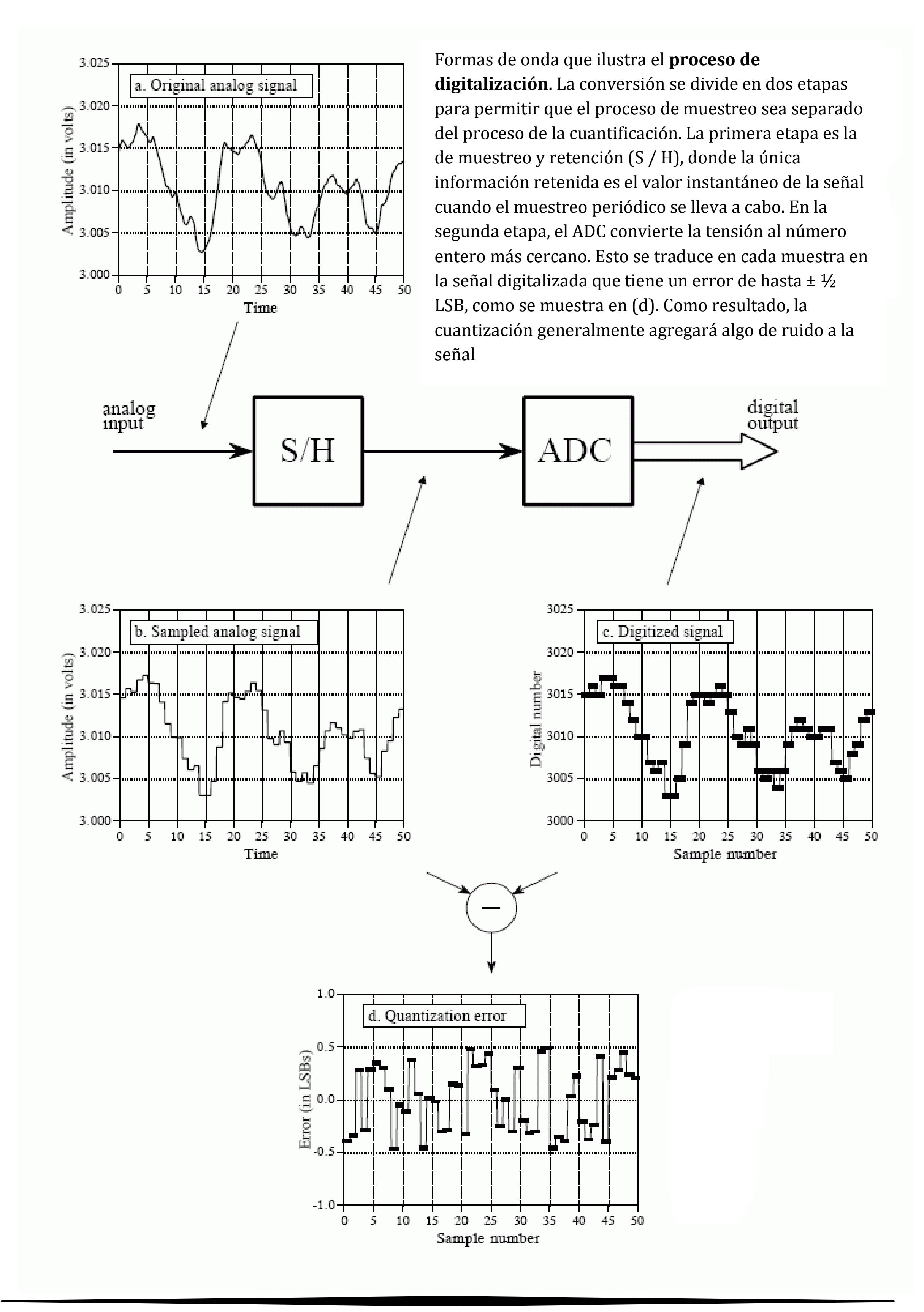
32-bit = (nnnnnnnn nnnnnnnn nnnnnnnn nnnnnnnn) = 4,294,967,296 pasos o “escalones”

donde “n” representa a un digito binario de 0 or 1.

Si vamos al detalle, explicar el proceso de reproducción/grabación de audio puede llegar a volverse muy complejo con cálculos bastante engorrosos hasta para interpretarlos. Pero los fundamentos básicos son:

- Toma de muestras (en el verdadero sentido de la palabra) a una señal de tensión analógica a intervalos precisos en el tiempo.
- Conversión de estas muestras a código digital
- Almacenamiento en un dispositivo de memoria digital

Tras la reproducción, estos códigos digitales se convierten de nuevo en tensiones discretas (una vez más, a intervalos precisos en el tiempo). De esta forma, permitiendo que los voltajes de las señales grabadas originalmente puedan ser re-creadas, procesadas y reproducidas.



Formas de onda que ilustra el **proceso de digitalización**. La conversión se divide en dos etapas para permitir que el proceso de muestreo sea separado del proceso de la cuantificación. La primera etapa es la de muestreo y retención (S / H), donde la única información retenida es el valor instantáneo de la señal cuando el muestreo periódico se lleva a cabo. En la segunda etapa, el ADC convierte la tensión al número entero más cercano. Esto se traduce en cada muestra en la señal digitalizada que tiene un error de hasta ± ½ LSB, como se muestra en (d). Como resultado, la cuantización generalmente agregará algo de ruido a la señal

Análisis Espectral

El **teorema de Fourier** establece que, toda onda compleja periódica se puede representar como la suma de ondas simples. Digamos que podemos construir una onda compleja periódica mediante la suma sucesiva de ondas simples. La serie de Fourier es una serie infinita que converge puntualmente a una función continua y periódica.

Las series de Fourier responden a la siguiente fórmula:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \right]$$

Donde $\mathbf{a_n}$ y $\mathbf{b_n}$ se denominan *coeficientes de Fourier* de la serie de Fourier de la función **f(x)**

Si f es una función (o señal) periódica y su periodo es 2T, la serie de Fourier puede expresarse como:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos \frac{n\pi}{T} t + b_n \sin \frac{n\pi}{T} t \right]$$

Donde los coeficientes de Fourier toman los valores:

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^{T} f(t) \cos(\frac{n\pi}{T} t) dt, \quad b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^{T} f(t) \sin(\frac{n\pi}{T} t) dt, \quad a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^{T} f(t) dt$$

Para las señales no periódicas, como por ejemplo la música, tenemos otras poderosas herramientas, como las **integrales de Fourier**. De ellas deriva la **Transformada de Fourier**, la cual responde a la fórmula:

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x}$$

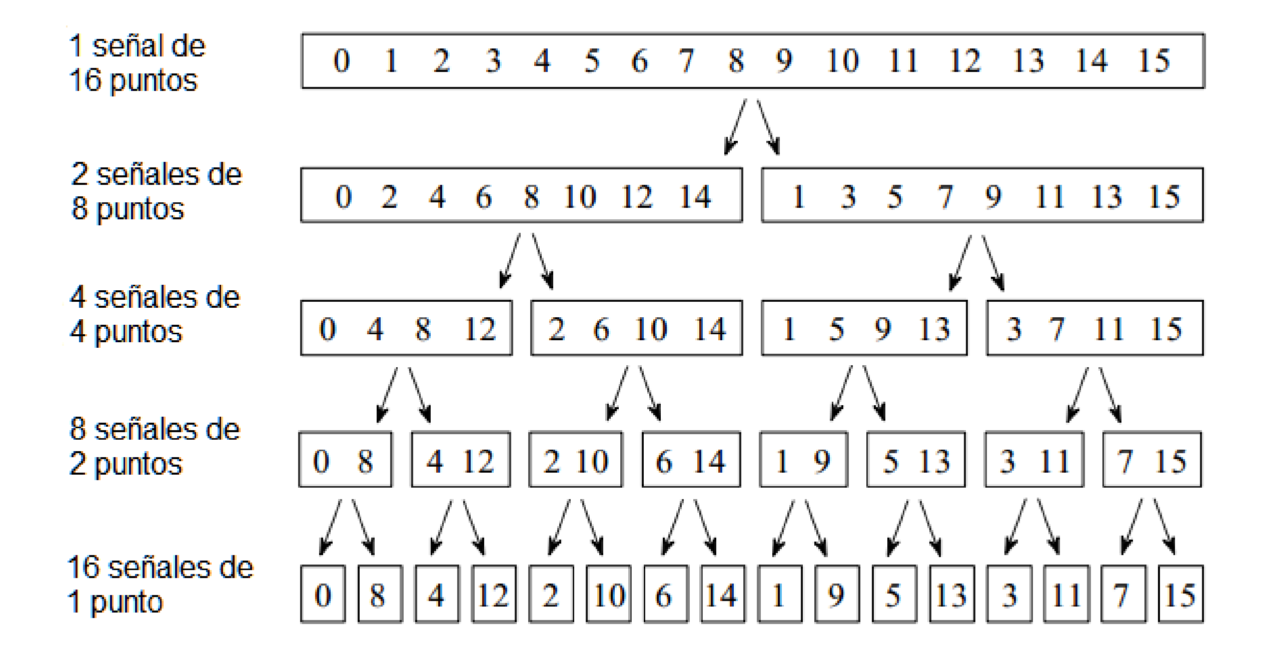
Mediante la transformada de Fourier podemos descomponer a las señales en cada una de las frecuencias que la componen.

Sin profundizar mucho más, diremos que partiendo de la Transformada de Fourier llegamos a la Transformada Discreta (también conocida como DTF, Discrete Fourier Transform) descrita a continuación:

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} \qquad j=0,\ldots,n-1$$

Finalmente estamos en condiciones de hablar del análisis espectral propiamente dicho. La herramienta fundamental del análisis espectral es la Transformada Rápida de Fourier, más conocida como FFT (Fast Fourier Transform). La FFT es un algoritmo que nos permite calcular en forma muy eficiente la DTF y su inversa. Es el arma principal del manejo de señales digitales y filtros de este tipo. Hay muchos algoritmos que permiten calcularla, todos coinciden en que permiten realizar un número N de muestras donde N es potencia de 2 (512, 1024, 2048, 4096 u 8192 muestras generalmente).

Es el algoritmo más famoso para el cálculo de una FFT, diseñado por J.W. Cooley y John Tukey en 1965. Tomando como entrada una señal discreta x[n] con N muestras, se basa en dividir la señal de entrada en otras dos señales de N/2 muestras (por un lado los coeficientes pares y por otro los impares), y se envían cada una de estas subseñales a una FFT de tamaño N/2 puntos.



Transformación bilineal

La transformada bilineal (también conocida con el nombre de **Método de Tustin**) es usada habitualmente en el campo del procesamiento digital de señales y en la Teoría de control de señales discretas. Esta herramienta matemática suele usarse para transformar la representación en tiempo continuo de las señal en tiempo discreto y viceversa.

Suele usarse para convertir una función de transferencia F(s) de un filtro lineal e invariante en el tiempo, que se encuentra definido en el dominio continuo del tiempo, en una función de transferencia F(z) perteneciente a un filtro lineal e invariante en el tiempo que se encuentre definido en el dominio discreto del tiempo, comúnmente llamado filtros digitales. Cabe resaltar que los filtros, aunque trabajen en dominio discreto del tiempo, no se tienen porque considerar digitales dado que existen una variante de filtros analógicos construido a partir de condensadores conmutados que por su naturaleza trabajan con muestras discretas).

La transformación bilineal es una aproximación de primer orden de la función logarítmica natural que consiste en realizar una asignación exacta del plano Z al plano S. Cuando la **transformada de Laplace** se realiza sobre una señal de tiempo discreto el resultado es precisamente la transformada Z de la secuencia de tiempo discreto.

$$z = e^{sT} = \frac{e^{sT/2}}{e^{-sT/2}} \approx \frac{1 + \frac{sT}{2}}{1 - \frac{sT}{2}}$$

Donde T es el periodo de muestreo (inverso a la Frecuencia de muestreo) del filtro discreto. La aproximación bilineal se realiza sustituyendo s por o una aproximación de $s = (1/T)\ln z$. La inversa de esta asignación (y su aproximación de primer orden bilineal) es:

$$s = \frac{1}{T}\ln(z) = \frac{2}{T}\left[\frac{z-1}{z+1} + \frac{1}{3}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)^3 + \frac{1}{5}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)^5 + \frac{1}{7}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)^7 + \cdots\right]$$

$$s \approx \frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right) = \frac{2}{T}\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)$$

En definitiva, la transformación bilineal consiste en sustituir esta aproximación de s en la función de transferencia del filtro en tiempo continuo, F(s).

Es decir:

$$F(z) = F(s)|_{\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)} = F\left(\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)\right)$$

Representaciones más usuales

$$x(n) \overset{z}{\leftrightarrow} X(z)$$
$$X(z) = \mathcal{Z}\{x[n]\}$$
$$x(n) = z^{-1}\{X(z)\}$$

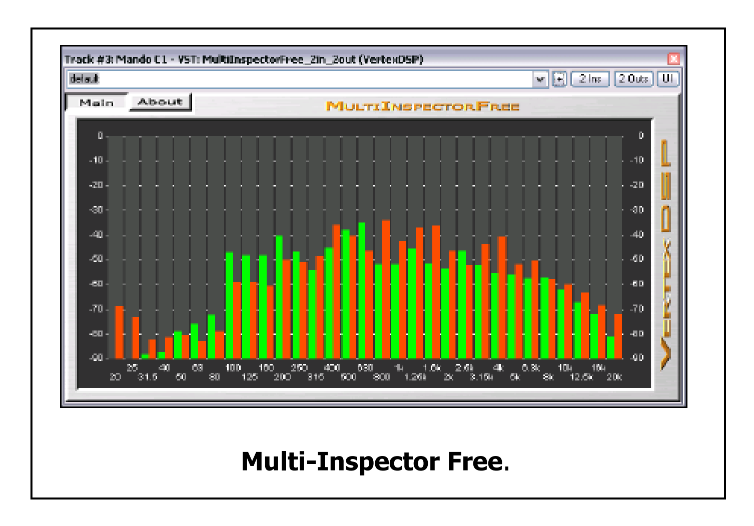
Usos comunes Transformación bilineal

- Obtención de expresiones entrada-salida.
- Simplificación de estructuras.
- Implementación de estructuras.
- Resolución de ecuaciones en diferencias
- Puente entre el diseño analógico y digital.

Como se puede observar de la lista de aplicaciones nuestro interés es ver como de un diseño análogo de un filtro se llega a uno digital.

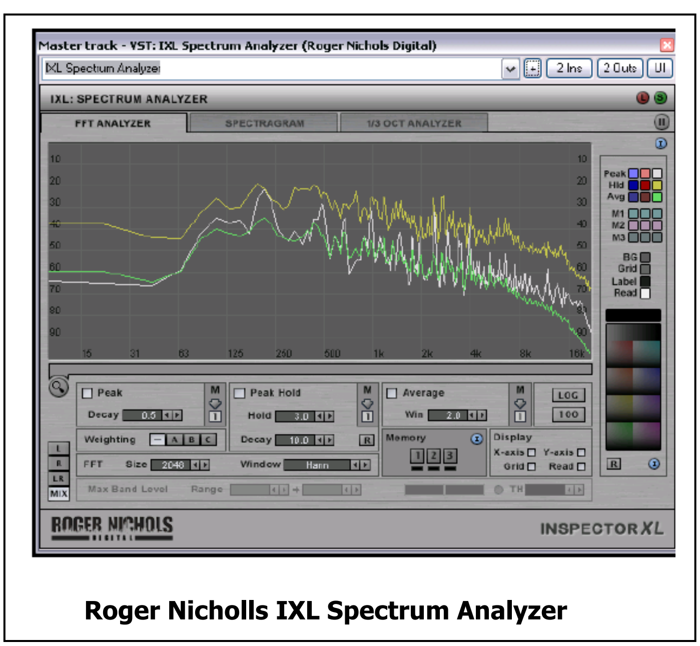
VST Plugins

Virtual Studio Technology (Tecnología de Estudio Virtual) o VST es una interfaz estándar desarrollada por Steinberg para conectar sintetizadores de audio y plugins de efectos a editores de audio y sistemas de grabación. Permite reemplazar el hardware tradicional de grabación por un estudio virtual con herramientas software.



Multi-Inspector Free.

Un VST es un programa de software que debe ser ejecutado mediante una aplicación que soporte esta tecnología, ejemplos de esto son Cubase, FL Studio, Reaper, Ableton Live, etc. Estos subprogramas se instalan al igual que cualquier otro software, pero no funcionan por su cuenta. Siempre necesitan trabajar dentro de un programa. Supongamos que me consigo un plugin de reverberación. Lo instalo y al abrir el editor el programa “carga” todos los complementos. Lo bueno es que esta reverb me servirá en cualquier editor, siempre y cuando éste sea compatible con la tecnología de ese plugin.



Roger Nicholls IXL Spectrum Analyzer

Los VSTs tienen la capacidad de procesar y generar audio, como también interactuar con interfaces MIDI.

En el caso de Windows los VSTs son archivos DLLs. Como estos son un archivo binario son dependientes de la plataforma donde se ejecutan, por lo que un VST compilado para Mac OS no funcionará en Windows y recíprocamente. En sistemas Linux se pueden utilizar como plugins del software de edición Audacity o bien instalarse las versiones de Windows con Wine.

Los plugins de audio aportan a un editor **efectos** (revers, delay, phaser…) **procesadores** (compresores, limitadores, expansores…) **limpiadores** (eliminadores de ruidos o noise reduction, anti scratch….) **analizadores de señal** y otras muchas aplicaciones.

Las ventajas de estas tecnologías es innegable; han hecho posible un sin número de producciones con limitaciones de acceso a determinadas herramientas y equipos debido a restricciones de presupuesto o a los altos costes de los estudios profesionales o porque no siempre es fácil encontrar algunos instrumentos y equipos que son maravillosos pero no siempre de fácil acceso.

Un gran número de plug-ins VST comerciales y de código abierto se escriben utilizando el marco "**Juce C++ framework**" en lugar de "**Steinberg's VST SDK**" (el lenguaje propio de Steinberg) ya que esto permite que los archivos sean multi formato.

Los VST son una tecnología de plugins, pero existen otras, entre las que se encuentran:

- **LADSPA (Linux Audio Developer's Simple Plugin)**

Plugins de audio para Linux. Funcionan con programas que trabajan sobre esta plataforma como el Ardour.

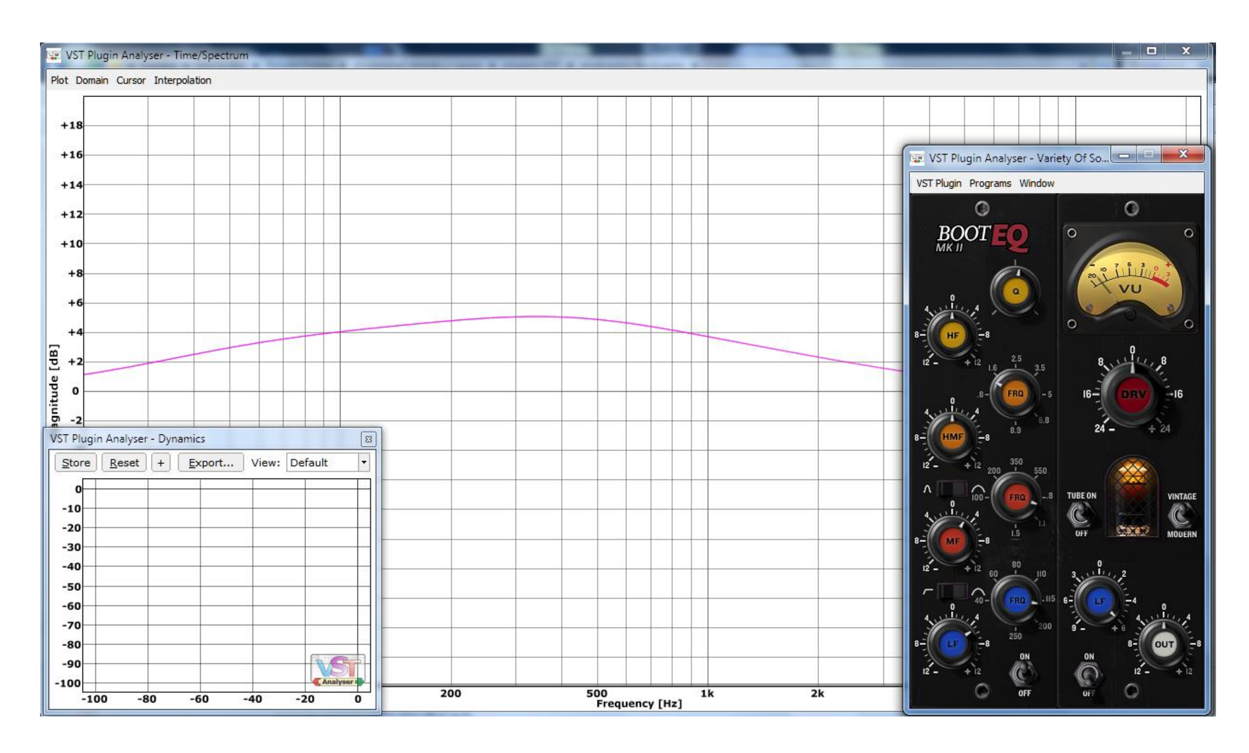
- **RTAS (Real Time Audio Suites)**

Formato de plugins especial para el software ProTools y los sistemas Digidesign. Pocos editores, además de éste, lo reconocen. Otro formato de plugins para Digi es TDM.

- **DX - Direct X**

Sólo son compatibles con los editores de audio que trabajan bajo Windows: Cakewalk, Sound Forge, Cubase, Cool Edit/Audtion... Por esta limitación, no está tan extendido como el VST.

VST Plugin Analyser es un software de Steinberg Media Technologies que facilita el análisis de los plugins vst mediante una interface gráfica donde se pueden realizar pruebas de rendimiento, respuesta en frecuencia, distorsión armónica, y más.



Bibliografía

- **Modern Recording Techniques - David Miles Huber (Capítulo 6 - Digital Audio Technology) ISBN: 978-0-240-81069-0**

- **Acústica y Sistemas de Sonido - Federico Miyara (Capítulo 15 - Audio Digital) ISBN: 978-950-673-557-9**

- **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing - By Steven W. Smith, Ph.D. (Capítulo 3: ADC and DAC) Publication Date: 1997 | ISBN-10: 0966017633 | ISBN-13: 978-0966017632 | Edition: 1st http://www.dspguide.com/**

- **Manual para Radialistas Analfatécnicos - Santiago García Gago**

- **John G. Proakis & Dimitris G. Manolakis - Digital signal processing - Principles algorithms and applications ISBN 0-13-394338-9**

EQ DIGITALES

Un Poco de Historia

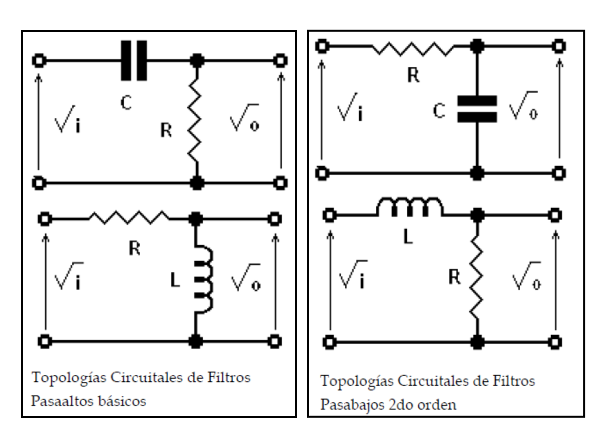
En los primeros días de la telefonía, los técnicos de Bell Labs se enfrentan a un problema: las frecuencias altas disminuían con cables largos, lo que provocaba que la voz en llamadas de larga distancia sea difícil de entender. Comenzaron a diseñar un circuito electrónico que impulsaría las frecuencias altas en el extremo receptor, y que podrían hacer igual sonido en ambos extremos de la línea. El nombre dado a este circuito fue: ecualizador.

Breve introducción

Un **ecualizador** es un tipo de filtro, que además de atenuar, nos permite enfatizar una porción del espectro, con un envolvente en frecuencia que depende del tipo de filtro a utilizar.

Por ello, permite aumentar o reducir la ganancia selectivamente en tres o más frecuencias. De este modo es posible resaltar frecuencias que estaban originalmente debilitadas, o atenuar otras de nivel excesivo. El ecualizador más sencillo es el clásico control de tono, que permite controlar según convenga tres grandes bandas fijas de frecuencia, denominadas genéricamente graves, medios y agudos.

En el Audio Analógico estos procesadores estaban armados con componentes como se muestran en los gráficos de la derecha. Para entender vamos a realizar algunas comparaciones y un breve repaso de cómo estaban armados para comprender su propósito. Los **Filtros Digitales**, utilizan funciones de transferencia, donde la respuesta final proviene de una fórmula matemática, funciones de punto impulsor-inmitancia terminal, etc. Estas funciones no solo son más precisas, sino que permiten topologías y configuraciones difíciles de lograr en el campo analógico. Además, permiten menores distorsiones, como los **filtros "linear phase"**



Topologías Circuitales de Filtros Pasaaltos básicos

Topologías Circuitales de Filtros Pasabajos 2do orden

Entonces los ecualizadores se utilizan para **varias funciones**: para enfatizar algunas frecuencias presentes en el espectro de la señal de entrada pero que por

alguna razón sufren atenuaciones dentro del sistema; para corregir problemas acústicos de la sala; para lograr ciertos efectos; para reducir el ruido total del sistema bloqueando las bandas de frecuencia en las cuales hay ruido pero no señal; buscar y atenuar puntos resonantes del espectro (barrido de frecuencias), etc.

Entonces podemos hablar por un lado de **Filtros**, que son procesadores que actúan modificando el espectro de la señal. Y como un ejemplo de aplicación de un filtro, **ecualizadores**, que son los que permiten corregir deficiencias en la respuesta en frecuencia de un sistema. Otros ejemplos de aplicación o funciones de los Filtros pueden ser: filtros pasaaltos o pasabajos (opcionalmente pueden intercalarse en las entradas de algunas consolas para evitar el ingreso de ruido), redes divisoras de frecuencia o crossover (utilizadas en los sistemas de bi o tri amplificación)

Filtros "Linear Phase"

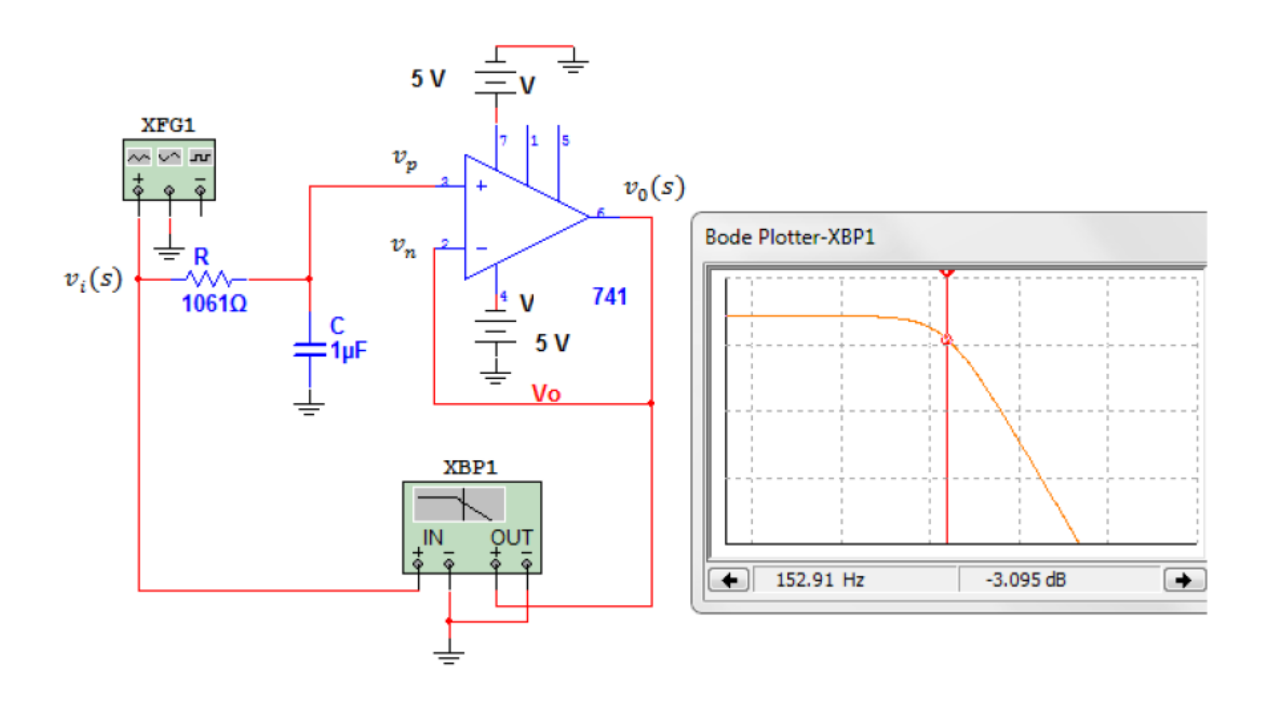
En español, filtros de fase lineal. Hay ciertos procesos digitales que pueden mejorar el corrimiento en fase que cada filtro provoca. Mediante técnicas de sobremuestreo de la señal y cambios internos del "sample rate" (tasa de muestreo), o mediante diferentes procesos de modificación del espectro por FFT se consigue alterar lo menos posible la respuesta en fase del ecualizador.

Vamos a ir de a poco explicando las clasificaciones y tipos de filtros hasta llegar al funcionamiento de un ecualizador digital, como explicaba antes, para poder comprender mejor su funcionamiento.

Filtros Pasabajos y Pasaaltos

Los **filtros pasabajos (PB)** son dispositivos que, intercalados en el camino de la señal, permiten pasar todas las frecuencias que están por debajo de cierta frecuencia llamada frecuencia superior de corte, bloqueando en cambio las frecuencias superiores a la misma. En la práctica, los filtros pasabajos reales no bloquean totalmente las altas frecuencias, sino que las atenúan a razón de una cierta cantidad de dB por octava.

Un filtro pasa bajo permite dejar pasar sin alterar la señal hasta cierta frecuencia llamada frecuencia de corte f_c, y luego de ella comienza a atenuar, con una determinada pendiente, las frecuencias que están por encima.



La función de transferencia

$$F(s) = \frac{v_0(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{(1 + sCR)} = \left[\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}}\right]$$

Donde,

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \qquad f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$$

Nótese que el filtro activo de primer orden tiene un polo (polinomio del denominador de primer orden). Para cualquier frecuencia la amplitud de la señal de salida del filtro está determinada por la magnitud de la función F(s)

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} e^{-j\theta}$$

donde θ es el ángulo de fase.

$$\theta = tan^{-1}(-\omega_c RC)$$

La transformación $s \Rightarrow z$ deberá ser estable, la mitad izquierda del plano s debe transformarse dentro del círculo unidad en el plano z.

A cada frecuencia analógica dentro del intervalo $(-\infty, \infty)$ le debe corresponder una única frecuencia en el intervalo $\left(-\frac{f_s}{2}, \frac{f_s}{2}\right)$. Esto evita el problema del aliasing.

Se empleará la transformada bilineal, ya que mediante ella cualquier filtro estable en s será también estable en z, además no hay “aliasing” ya que a cada frecuencia analógica le corresponderá una digital.

Este filtro (pasa bajos) posee una función de transferencia definida en el dominio continuo del tiempo.

$$F(s) = \frac{v_0(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{(1 + sCR)} = \left[\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}}\right] = \left[\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}}\right]$$

Para diseñar el filtro digital, únicamente se aplica la transformación bilineal que acabamos de ver, sustituyendo la s de la formula por la expresión vista antes.

$$F(z) = F(s)|_{\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)} = F\left(\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)\right)$$

$$F(s) = \left[\frac{1}{1+\frac{s}{\omega_c}}\right] \rightarrow F(z) = \left[\frac{1}{1+\frac{1}{\omega_c}\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)}\right] = \left[\frac{z+1}{z+1+\frac{1}{\omega_c}\frac{2}{T}(z-1)}\right]$$

$$F(z) = \left[\frac{z^{-1}+1}{\left(1+\frac{1}{\omega_c}\frac{2}{T}\right)+z^{-1}\left[1-\frac{1}{\omega_c}\frac{2}{T}\right]}\right] = \left[\frac{z^{-1}+1}{a_0+a_1 z^{-1}}\right]$$

De esta expresión nos serán útiles los coeficientes del polinomio del denominador y los del numerador. Ambos se usaran para implementar finalmente el filtro digital.

$$a_0 = \left(1+\frac{2}{\omega_c T}\right) \qquad a_1 = \left(1-\frac{2}{\omega_c T}\right)$$

Hay muchas formas de **representar un filtro**. Por ejemplo, en función de ω (frecuencia digital), en función de Z y en función de n (número de muestra). Todas son equivalentes, pero a la hora de trabajar a veces conviene más una u otra. Como regla general se suele dejar el término a_0=1.

Si se expresa en función de Z y en forma de fracción:

$$F(s) = \frac{\sum_{k=0}^{M} b_k\, z^{-k}}{\sum_{k=0}^{N} a_k\, z^{-k}}$$

En el dominio de n:

$$y[nT] = \sum_{k=0}^{N} b_k \, x[(n-k)T] - \sum_{k=1}^{M} a_k \; y[(n-k)T]$$

Siendo T la tasa de muestreo. Los coeficientes son los **a** y **b** y son los que definen el filtro, por lo tanto el diseño consiste en calcularlos y obtener $y[nT]$.

Para el filtro pasa bajo en cuestión tenemos:

$$F(z) = \left[\frac{z^{-1} + 1}{a_0 + a_1 z^{-1}}\right]$$

$$y[nT] = x[nT - T] + x[nT] - a_0 y[nT] - a_1 y[nT - T]$$

$$y[nT] = \frac{1}{(1 + a_0)} \{x[nT - T] + x[nT] - a_1 y[nT - T]\}$$

Esto muestra que la salida del sistema general de tiempo discreto, $y[nT]$, para cualquier valor n, está determinado por las **N** entradas presente y previas $[x[nT], x[nT - T]]$ y las **M** salida pasada $[\; y[nT - T]\;]$.

La **ecuación de diferencia de tiempo discreto** involucra sólo sumas y multiplicaciones las cuales pueden ser realizadas muy fácilmente usando técnicas digitales. Todo esto requiere que los *ecuación de diferencia de tiempo discreto (*)* s en memoria y luego multiplicados con lo $- kT]$.

Estas entradas y salidas pasadas deben también ser almacenadas en memoria de modo que puedan estar disponibles para cuando se necesiten.

Debe mencionarse que la solución expuesta requiere (N+M) multiplicaciones y otras tantas sumas para cada valor de n. Si se supone que M=N, se requieren 4.N operaciones por cada punto. Si hay también N puntos, hay $4.N^2$ operaciones requeridas para encontrar la secuencia completa de salida.

Un cálculo de 16 puntos requiere 1024 operaciones; un cálculo de 64 puntos requiere 16384 operaciones. Es obvio que aunque los cálculos son sencillos, los tiempos necesitados para hacerlos con valores de N grandes serían excesivos. Cada valor requerido para determinar la sumatoria de la ecuación (*) debe ser buscado desde la memoria al procesador, ejecutar una instrucción (ADD o MULTIPLY), y almacenar la suma o producto en la memoria.

Este es un hecho que limita el uso de las computadoras digitales y microprocesadores en aplicaciones de procesamiento de señal. Sin embargo, se ha visto que el tiempo puede ser reducido en un factor proporcional a $N.\log_2(N)$, introduciendo un gran ahorro en tiempo.

Volviendo a la ecuación (*), varios términos pueden ser definidos a partir de ella. Estos términos estarán relacionados a un sistema general de tiempo discreto cuyas relaciones I/O (entrada/salida) son integradas por esta ecuación.

Si sólo las **entradas pasadas y presentes** determinan la salida presente (en este caso $b_i = 0$ con $1 \leq i \leq M$) el sistema de tiempo discreto se llama **norecursivo**. Si además de las **entradas presentes y pasadas**, **las salidas pasadas** también determinan la salida presente, el sistema se llama **recursivo**.

Para tener alguna idea de los sistemas que son representados por la ecuación (*), considérese una como la siguiente:

$$y[nT] = \frac{a_0}{b_0}x[nT] + \frac{a_1}{b_0}x[(n-1)T]$$

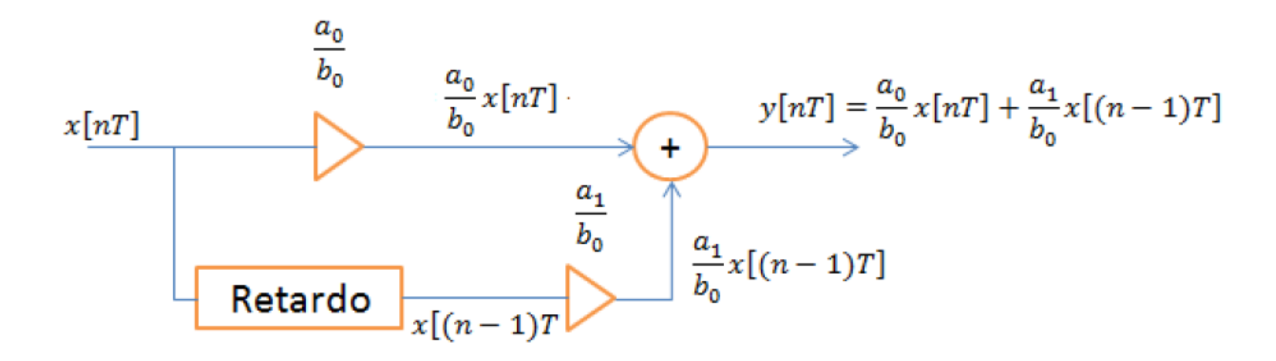
A partir de las definiciones previas, la ecuación anterior representa un sistema no recursivo con N=1. Se ve que la salida se obtiene por la presente [x(n.T)] y la más reciente de las entradas [x((n-1).T)] sin términos de salidas pasadas. Si se desea realizar esta ecuación con hardware, debe incluirse:

(a) dos multiplicadores (por ejemplo, amplificadores o atenuadores),

(b) un circuito sumador

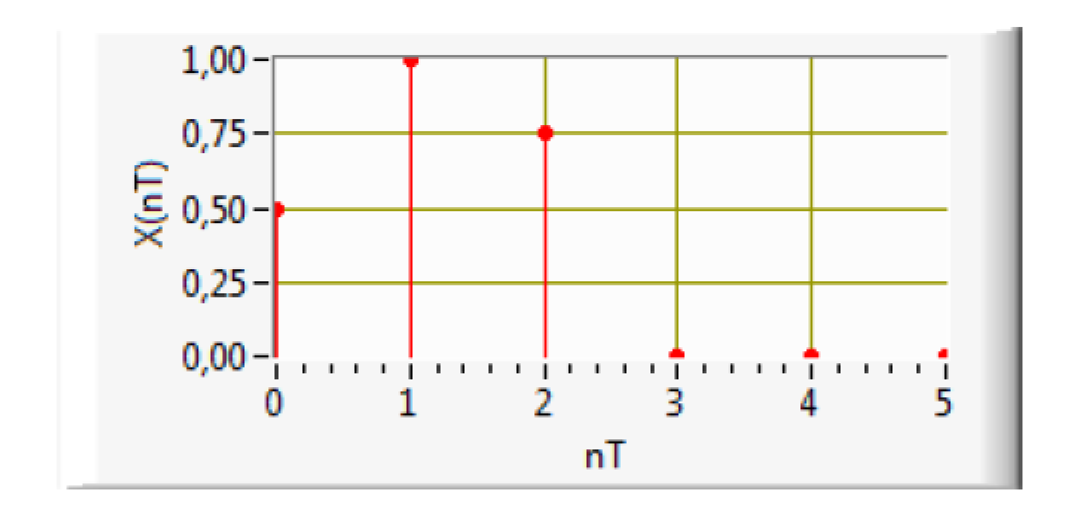
(c) un dispositivo que pueda almacenar la entrada previa por un intervalo de muestreo de modo que pueda ser sumada a la presente.

Los dos primeros dispositivos pueden ser fácilmente fabricados a partir de dispositivos analógicos o digitales. El tercer ítem en el circuito debe proveer almacenamiento por un intervalo de muestreo [desde (n.T-T) a n.T]. Esto puede ser llevado a cabo más fácilmente por una memoria o un registro de desplazamiento. La Figura siguiente muestra el diagrama en bloques de un circuito que puede ser usado para realizar la ecuación.



La señal de entrada, para un instante de muestreo dado, se aplica a la entrada del sistema donde es multiplicada por a_0/b_0 y a la misma vez almacenada en un delay (retardo) hasta el próximo instante de muestreo. La salida de la unidad delay para cualquier instante de muestreo es siempre la entrada del instante de muestreo previo.

Para ver cómo opera el circuito, considérese {x(n.T)} como la secuencia mostrada en la siguiente Figura.



Los parámetros del circuito son elegidos como a_0/b_0 =1 y a_1/b_0 =0.5.

Para n.T=0, se aplica al sistema x(0)=0.5. Como x((n-1).T)=x((n.T-T)=x(-T)=0, un valor 0 fue almacenado en la unidad delay en el instante de muestreo previo (n.T = - T). La salida es entonces:

$$y[nT] = 1\,x[nT] + 0.5\,x[(n-1)T]$$

Para n.T = 0, esta se transforma en:

$$y[0] = 1\,x[0] + 0.5\,x[(-1)] = 1 * 0.5 + 0.5 * 0 = 0.5$$

Al mismo tiempo que x(0)=0.5 está siendo multiplicada y alimentada al sumador de salida, está siendo almacenada en la unidad delay para ser usada en el próximo instante de muestreo.

Para n.T=T, x(T)=1, x((n-1).T)=x((n.T-T)=x(0)= 0.5, la cual ha sido almacenada en el instante previo. La salida es entonces:

$$y[1] = 1\,x[1] + 0.5\,x[0] = 1 * 1 + 0.5 * 0.5 = 1.25$$

Para n.T = 2.

$$y[2] = 1\,x[2] + 0.5\,x[(1)] = 1 * 0.75 + 0.5 * 1 = 1.25$$

Para n.T = 3.T

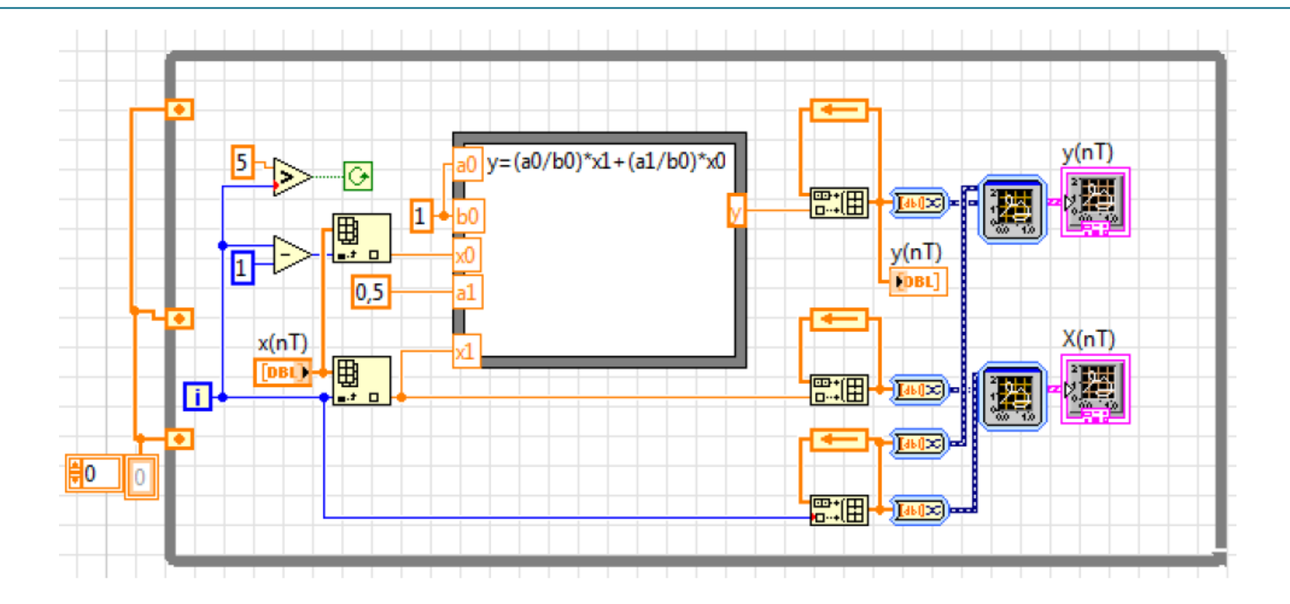
$$y[3] = 1\,x[3] + 0.5\,x[(2)] = 1 * 0 + 0.5 * 0.75 = 0.375$$

Para n.T = 4.T

$$y[4] = 1\,x[4] + 0.5\,x[(3)] = 1 * 0 + 0.5 * 0 = 0$$

De ahí en adelante todos los demás valores son nulos.

Una aplicación que nos permite desarrollar fácilmente filtros digitales es LabVIEW. Para tratar este problema, se crea un vector con los datos agregándole una entrada (la última) en cero ante la imposibilidad de trabajar con subíndices negativos. En la siguiente imagen podemos apreciar el diagrama:



El ejemplo anterior establece las reglas básicas para representar :

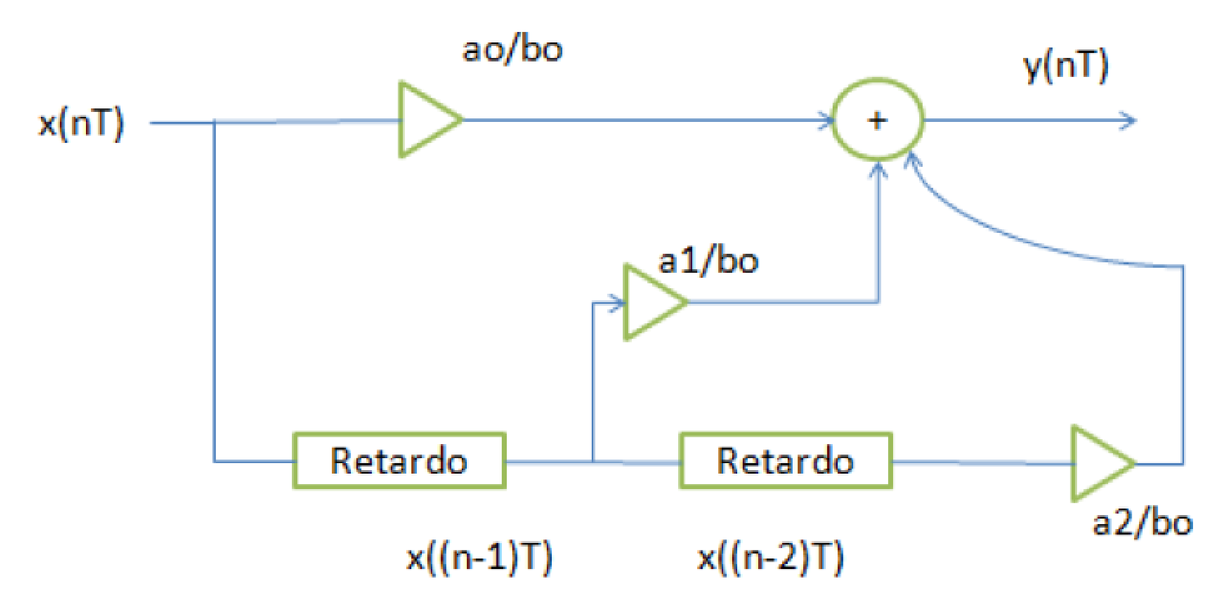
$$y[nT] = 1\,x[nT] + 0.5\,x[(n-1)T]$$

Cada término en la ecuación requiere una sección multiplicadora y un delay: la salida de un delay, x(n.T- r.T) fue almacenada en el tiempo de muestreo previo. Las unidades delay están conectadas de tal modo que cada una tenga su salida disponible, de manera que pueda ser usada como la entrada al sumador o a otra sección delay.

Para demostrar esto, se representará un sistema no recursivo con N=2 en forma de diagrama de bloque. La ecuación para este sistema está dada por:

$$y[nT] = \frac{a_0}{b_0}x[nT] + \frac{a_1}{b_0}x[(n-1)T] + \frac{a_2}{b_0}x[(n-2)T]$$

Esto se realiza con el circuito siguiente:

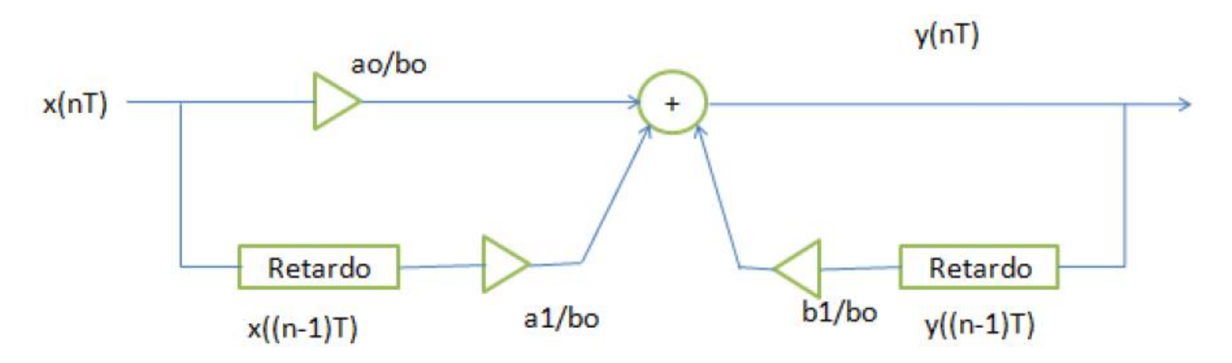


La salida presente de cada unidad delay es la entrada del instante de muestreo previo. Si el sistema incluye una o más salidas pasadas es recursivo.

Un simple sistema recursivo es uno con N=M=1.

$$y[nT] = \frac{a_0}{b_0}x[nT] + \frac{a_1}{b_0}x[nT - T] - \frac{b_1}{b_0}y[nT - T]$$

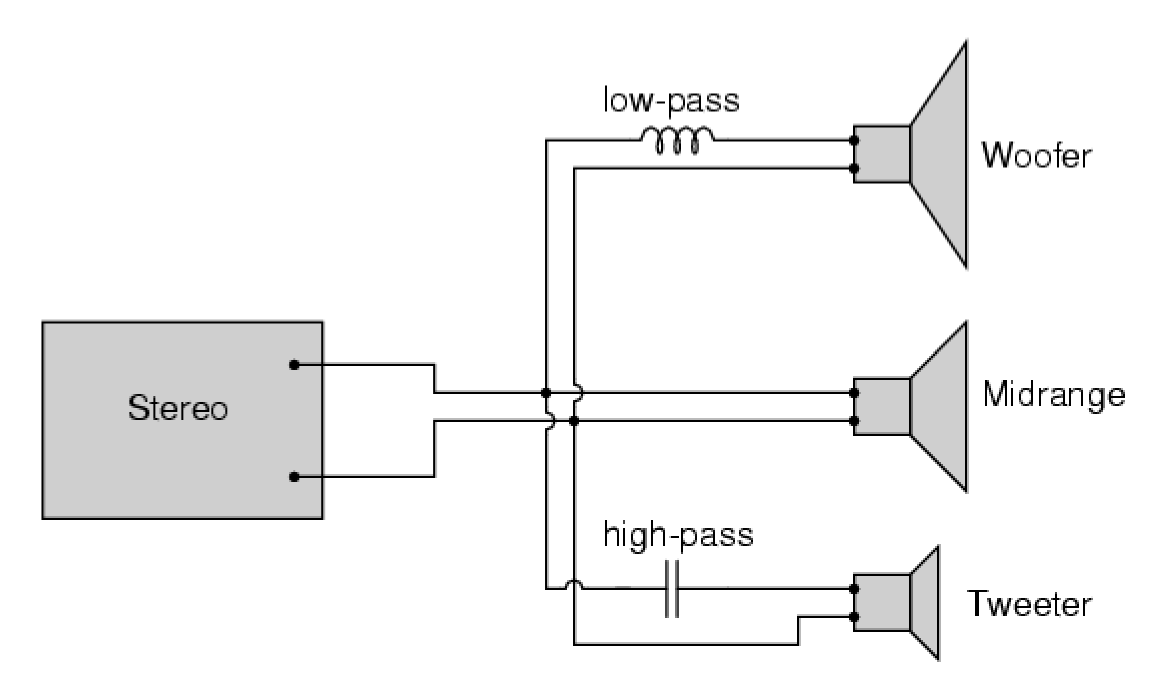
La realización del circuito usa los mismos dispositivos que para los sistemas no recursivos. El circuito que produce la ecuación anterior está dado por:



La salida del sistema en n.T depende ahora de la salida del sistema en $n.T - T[((n-1).T)]$ así también como de la presente [y(n.T)] y de la entrada más reciente pasada [x((n-1).T)] (en este caso la salida pasada debe también ser almacenada).

Por otro lado los **filtros Pasa Altos**, cumplen la función inversa, para no extendernos demasiado veremos una explicación más simple de cómo funcionan internamente.

Los Pasa Altos, atenúan el espectro hasta una determinada frecuencia, para luego dejar pasar con la misma intensidad al resto de las frecuencias más altas. Posee las mismas características que los Pasa Bajos (frecuencia de corte y pendiente), pero a la inversa, lo que no sorprende ya que en topologías circuitales la inversa del Pasa Bajos es el Pasa Altos. Es por ello que al invertirlos, la frecuencia de corte es exactamente la misma, por lo que nos puede ser muy útil al armar una red divisora (**crossover**), donde podemos sintonizar la misma frecuencia de corte para ambos filtros, y así cubrir todo el espectro al sumar.



Por lo tanto a este filtro lo comprendemos de la siguiente manera:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC},$$

Donde f_c (frecuencia de corte) está en Hertz, T en segundos, R en Ohms, y C en faradios

El siguiente algoritmo es un pseudocódigo que simula el efecto de este tipo de filtro sobre un conjunto de muestras digitales

```
// Return RC high-pass filter output samples, given input samples,
 // time interval dt, and time constant RC
 function highpass(real[0..n] x, real dt, real RC)
   var real[0..n] y
   var real α := RC / (RC + dt)
   y[0] := x[0]
   for i from 1 to n
     y[i] := α * y[i-1] + α * (x[i] - x[i-1])
   return y
```

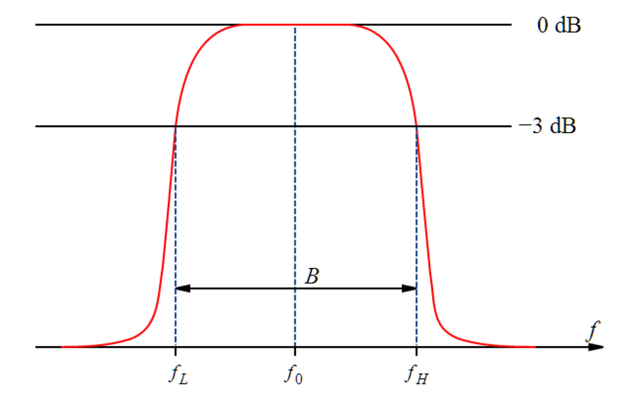
El bucle que calcula cada una de las n salidas puede ser reprogramado para utilizar el equivalente:

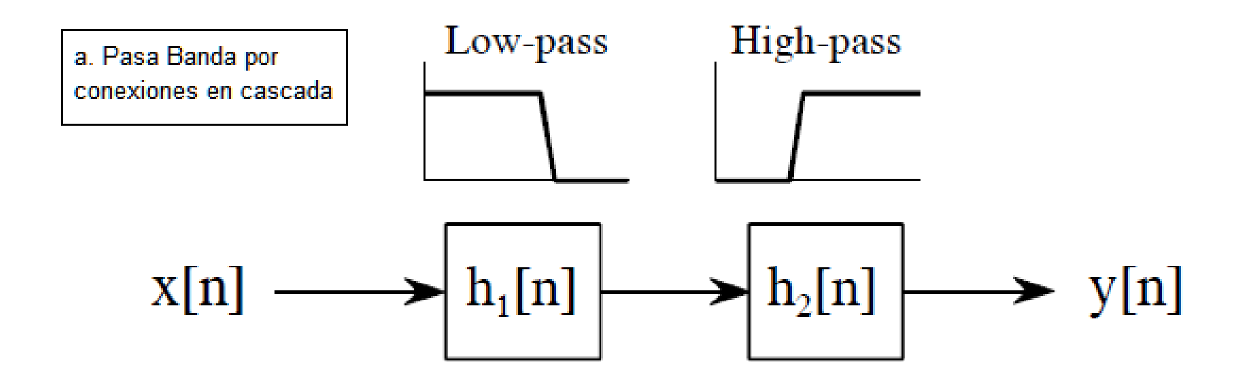
```
   for i from 1 to n
     y[i] := α * (y[i-1] + x[i] - x[i-1])
```

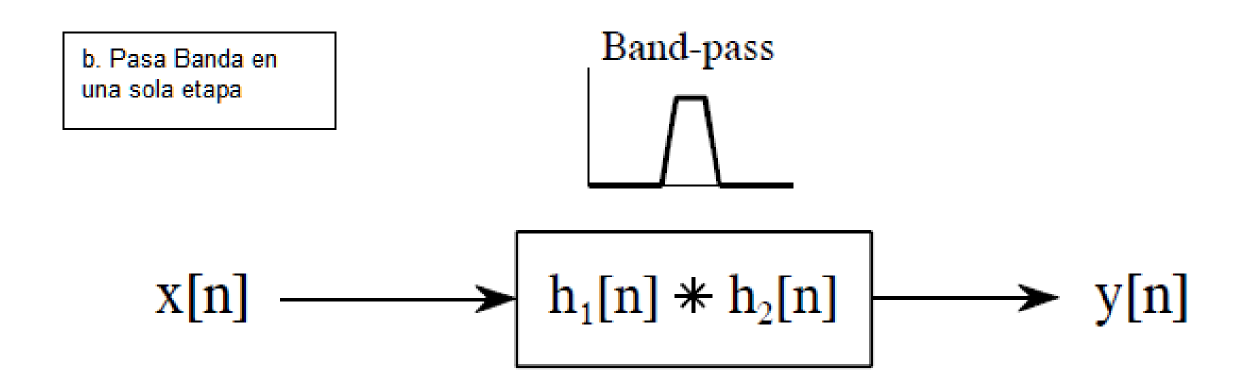
La expresión para el parámetro α da la constante del tiempo equivalente

Filtros Pasa Banda

De la combinación de Filtros Pasa Bajos y Pasa Altos obtenemos esta clase de filtros, donde en la Banda de Paso se encontrarán las frecuencias deseadas, y el resto serán atenuadas.







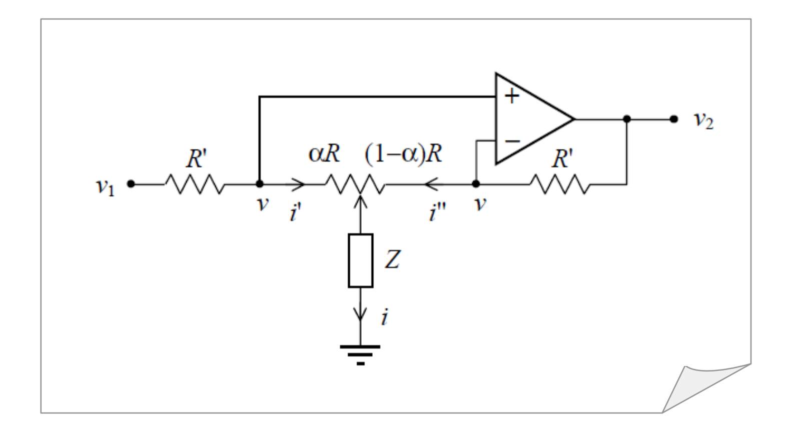
Donde **h(n)** son los coeficientes, **x(n)** representa la entrada e **y(n)** la salida

Filtros Elimina Banda

Conocidos como Band-Reject o Notch, son el filtro inverso al Pasabanda

Ecualizadores Gráficos

Están divididos en bandas de frecuencia. Cada banda está centrada en una frecuencia determinada, perteneciente a una lista estándar de frecuencias seleccionadas para que la relación entre dos frecuencias consecutivas sea aproximadamente constante. Este tipo de distribución de las bandas está relacionada con la percepción logarítmica de la escala de frecuencias por el oído. Así, en los ecualizadores de bandas de octava, las frecuencias están elegidas de modo que cada frecuencia sea el doble de la anterior (ya que subir una octava equivale a multiplicar por 2). Por otra parte, en los ecualizadores por bandas de tercio de octava cada frecuencia es aproximadamente un 25 % mayor que la anterior.



Aplicaciones de los Ecualizadores en las producciones musicales

Aunque los ecualizadores no son las únicas herramientas que alteran las frecuencias, por lo general, son las más comunes. En términos generales, cambian la distribución espectral de las señales. Por esta simple capacidad, es el catalizador de unas cuantas aplicaciones trascendentales, entre las que se encuentran:

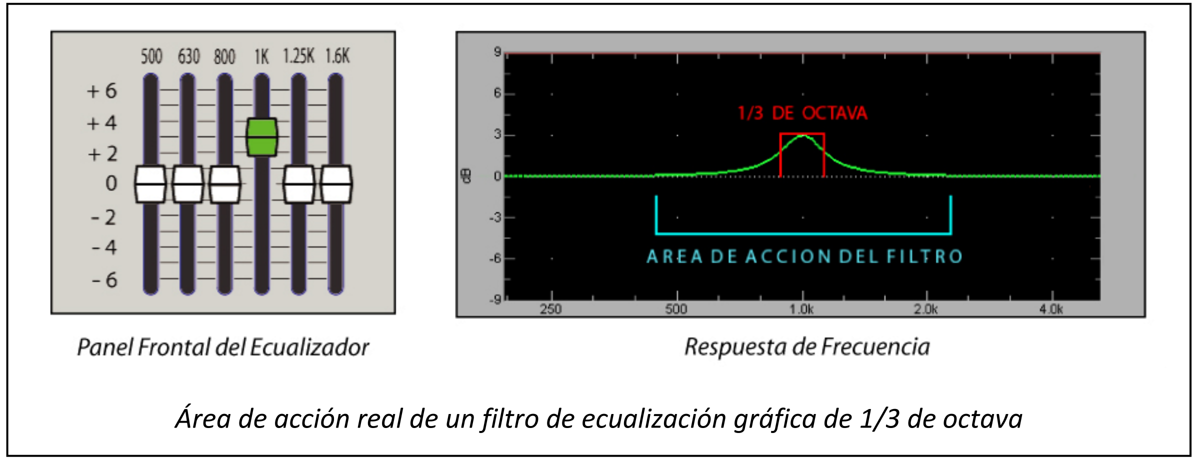
Espectro de frecuencia equilibrado: *Es un aspecto muy importante en la mezcla, ya que existiendo sectores en el espectro que están demasiado presentes o viceversa, nos ayudan a emparejar.*

Pronunciar la aparición de los instrumentos: *En el caso de una producción musical, el ecualizador nos permite el control total sobre la altura espectral de cada uno de los instrumentos. De esta manera, podemos hacer sonidos: delgados o gordos, filoso o suave, y más. Este es uno de los aspectos más creativos en la mezcla.* **Etcétera*

En la tabla que se muestra a continuación se aprecian las frecuencias estándar que se utilizan en los ecualizadores de bandas de octava, 2/3 de octava, 1/2 octava y 1/3 octava.

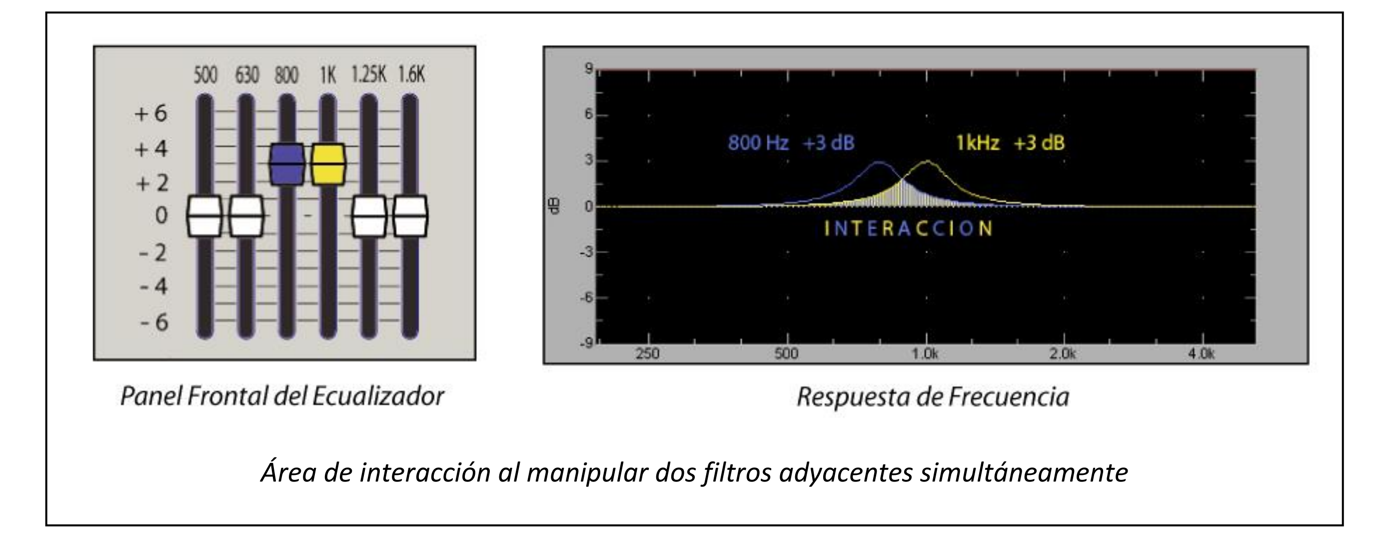
f [Hz]	1	2/3	1/2	1/3	f [Hz]	1	2/3	1/2	1/3	f [Hz]	1	2/3	1/2	1/3
20				*	200				*	2.000	*		*	*
22,4			*		224					2.240				
25		*		*	250	*	*	*	*	2.500		*		*
28					280					2.800			*	
31,5	*		*	*	315				*	3.150				*
35,5					355			*		3.550				
40		*		*	400		*		*	4.000	*	*	*	*
45			*		450					4.500				
50				*	500	*		*	*	5.000				*
56					560					5.600			*	
63	*	*	*	*	630		*		*	6.300		*		*
71					710			*		7.100				
80				*	800				*	8.000	*		*	*
90			*		900					9.000				
100		*		*	1.000	*	*	*	*	10.000		*		*
112					1.120					11.200			*	
125	*		*	*	1.250				*	12.500				*
140					1.400			*		14.000				
160		*		*	1.600		*		*	16.000	*	*	*	*
180			*		1.800					18.000				
										20.000				*

En el caso de un ecualizador gráfico de 1/3 de octava, la palabra “gráfico” se refiere a la habilidad de mostrar en su panel frontal la compensación aplicada a nuestras señales, mientras que la denominación “1/3 de octava” se refiere a que cada filtro afectará a una frecuencia central específica así como a toda frecuencia que se encuentre a 1/3 de octava a su alrededor. En el terreno de lo práctico y por razones implícitas a su naturaleza de diseño, la afección sobre la zona de actuación no será perfecta, haciendo que la cantidad de amplitud seleccionada se aplique sobre la frecuencia central y paulatinamente y en menor proporción a las frecuencias de su alrededor, incluso rebasando el área de 1/3 de octava.

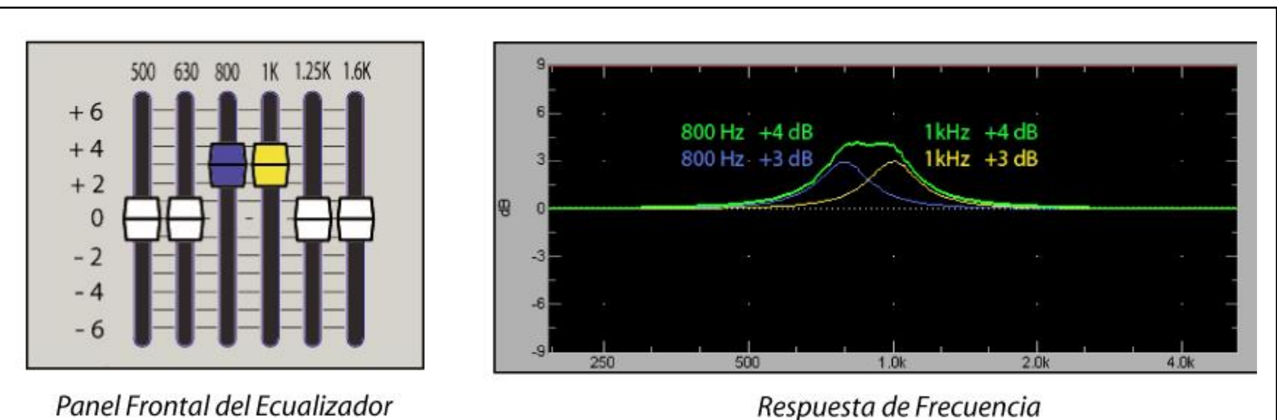


Área de acción real de un filtro de ecualización gráfica de 1/3 de octava

Debido a la imperfección anterior, al utilizar dos o más filtros adyacentes siempre existirá una zona de interacción entre ellos.



Área de interacción al manipular dos filtros adyacentes simultáneamente

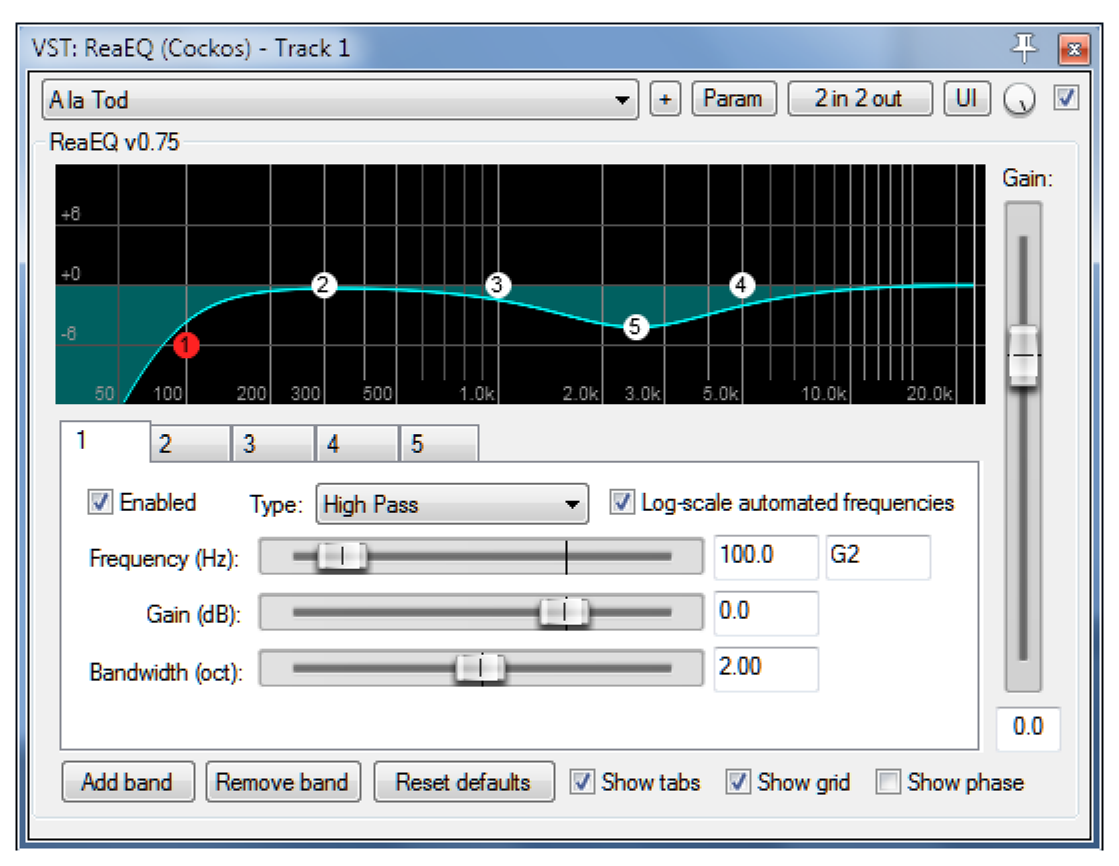


Amplitud resultante, al manipular dos filtros adyacentes con valores individuales de 800 Hz +3dB, 1 kHz +3dB

Ecualizadores Paramétricos

Este tipo de ecualizador, permite controlar por cada banda, su ganancia, frecuencia y factor de calidad (Q) independientemente. Esto lo hace muy útil gracias a su versatilidad.

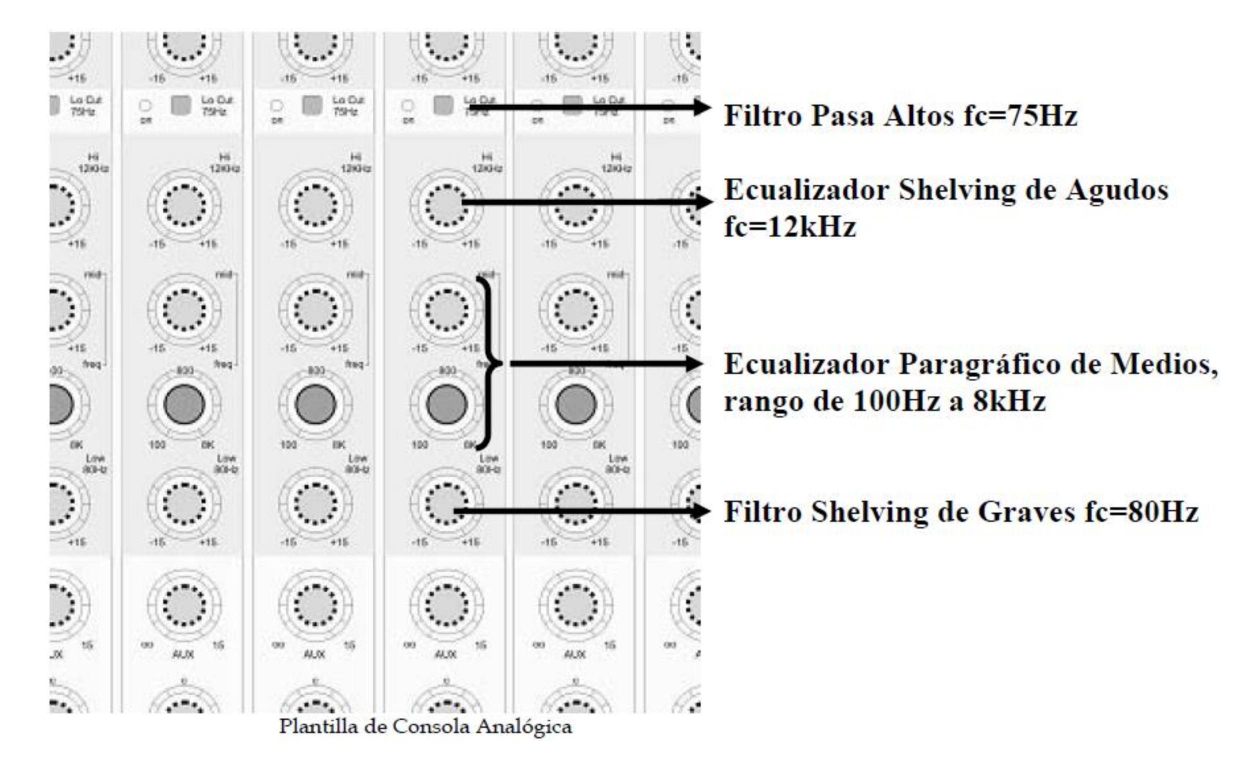
Un ejemplo de este tipo de ecualizador, podemos citar a ReaEQ que viene junto con la plataforma multipista (DAW) Reaper



Se puede apreciar, que por cada banda se puede manejar su frecuencia, ganancia y factor de calidad (Bandwidth) de forma independiente.

Ecualizador Paragráfico

Estos ecualizadores son similares a los Paramétricos, sonde uno puede ajustar la ganancia deseada en una frecuencia ajustable, pero no puede variear el Q de la campana. Es común verlos en las consolas analógicas

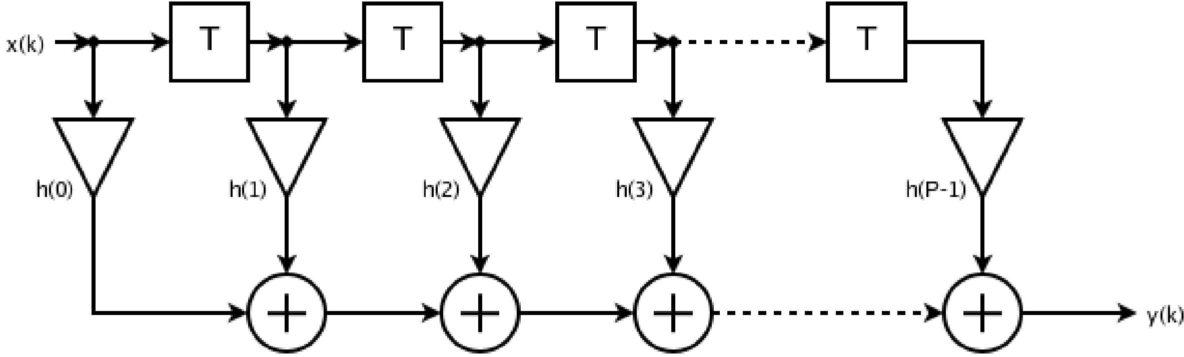


Plantilla de Consola Analógica

Filtros FIR e IIR

FIR es un acrónimo en inglés para Finite Impulse Response o Respuesta finita al impulso. Se trata de un tipo de filtros digitales cuya respuesta a una señal impulso como entrada tendrá un número finito de términos no nulos.

La estructura básica de un FIR es:



En la figura los términos h(n) son los coeficientes y los T son retardos.

Pueden hacerse multitud de variaciones de esta estructura. Hacerlo como varios filtros en serie, en cascada, etc.

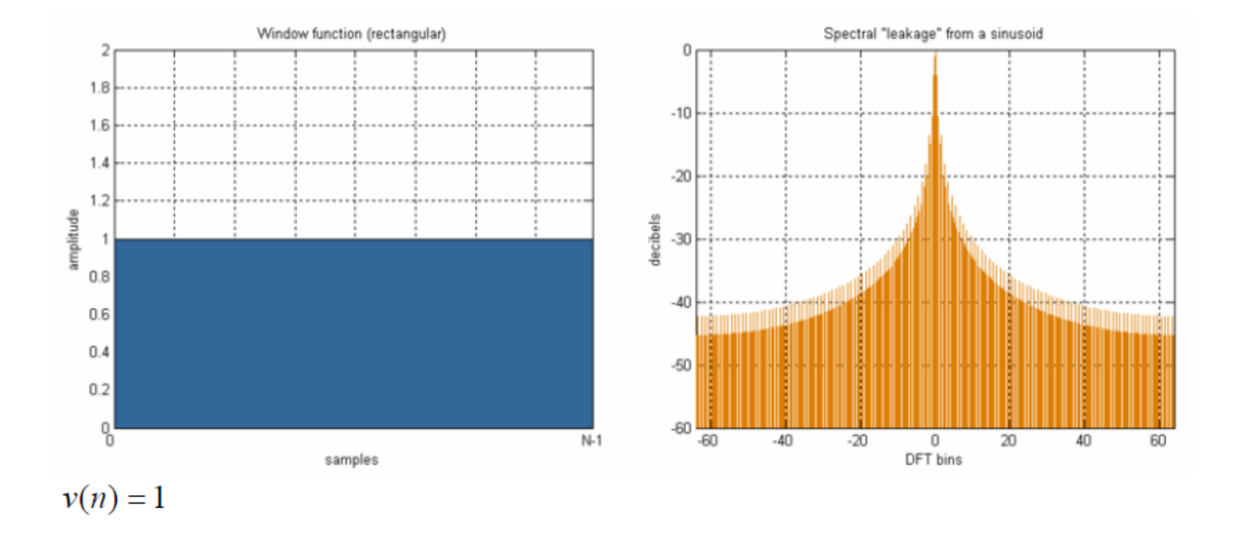
Para diseñar un filtro hay que seleccionar los coeficientes de tal manera que el sistema cumpla características específicas. Hay cuatro métodos básicos para encontrar los coeficientes partiendo de las especificaciones de frecuencia:

- **Método de las ventanas**,

Son funciones matemáticas utilizadas generalmente en el análisis y procesamiento de señales, que nos permite aislar una porción de la señal a analizar y desechar el resto en mayor o menor medida.
las más habituales son:

Rectangular

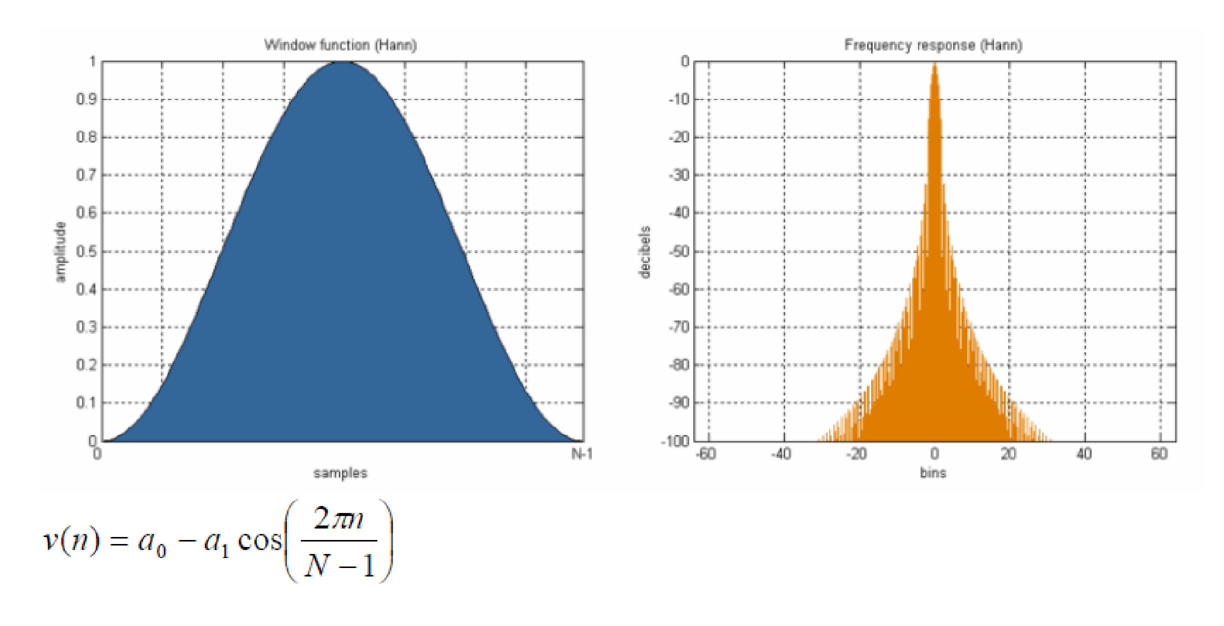
Es la más simple de todas, y también se la conoce como Ventana de Dirichlet



$$v(n) = 1$$

Hann

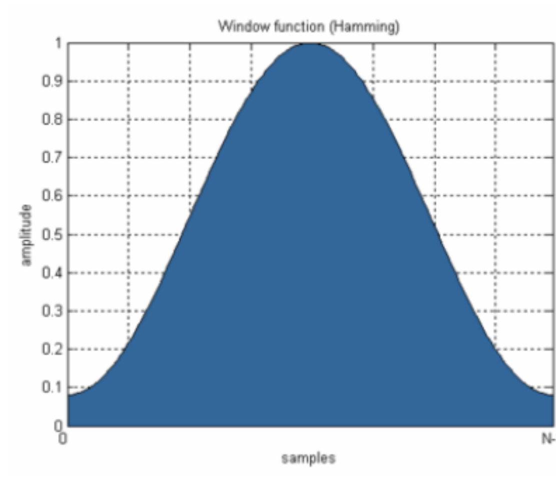
Las ventanas de Hann y de Hamming son de la familia de las ventanas de "cosenos elevados", y comúnmente son confundidas una con la otra

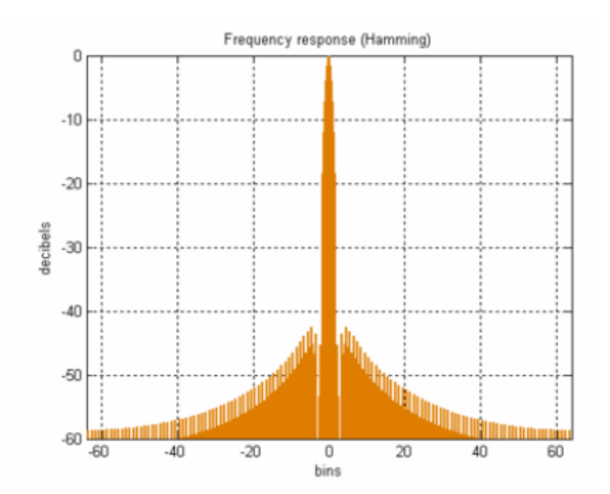


$$v(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

Hamming

La altura máxima de los lóbulos laterales es de alrededor de un quinto del de la ventana de Hann, un coseno elevado con coeficientes más simples.

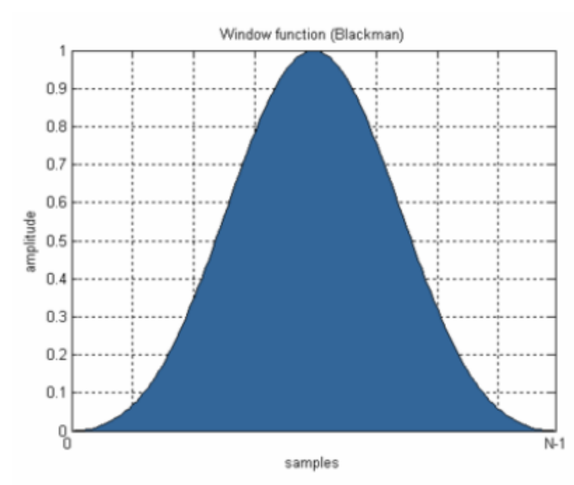


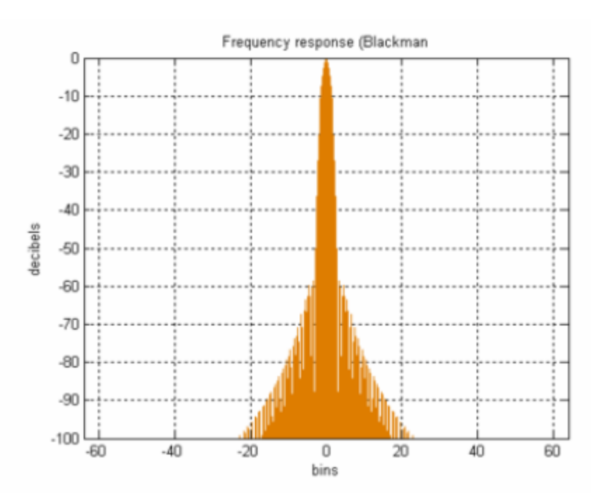


$$v(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

$$a_0 = 0{,}53836; \quad a_1 = 0{,}46164$$

Blackman

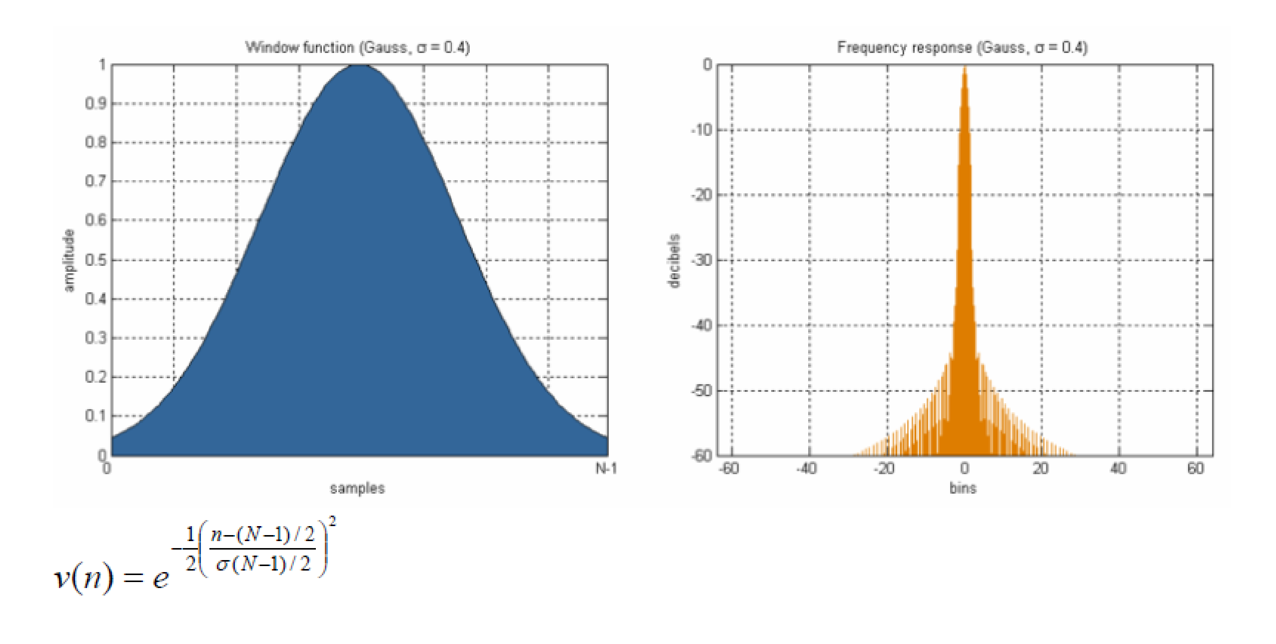




$$v(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$

$$a_0 = 0{,}42; \quad a_1 = 0{,}5; \quad a_2 = 0{,}08;$$

Gaussiana



$$v(n) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{n-(N-1)/2}{\sigma(N-1)/2}\right)^2}$$

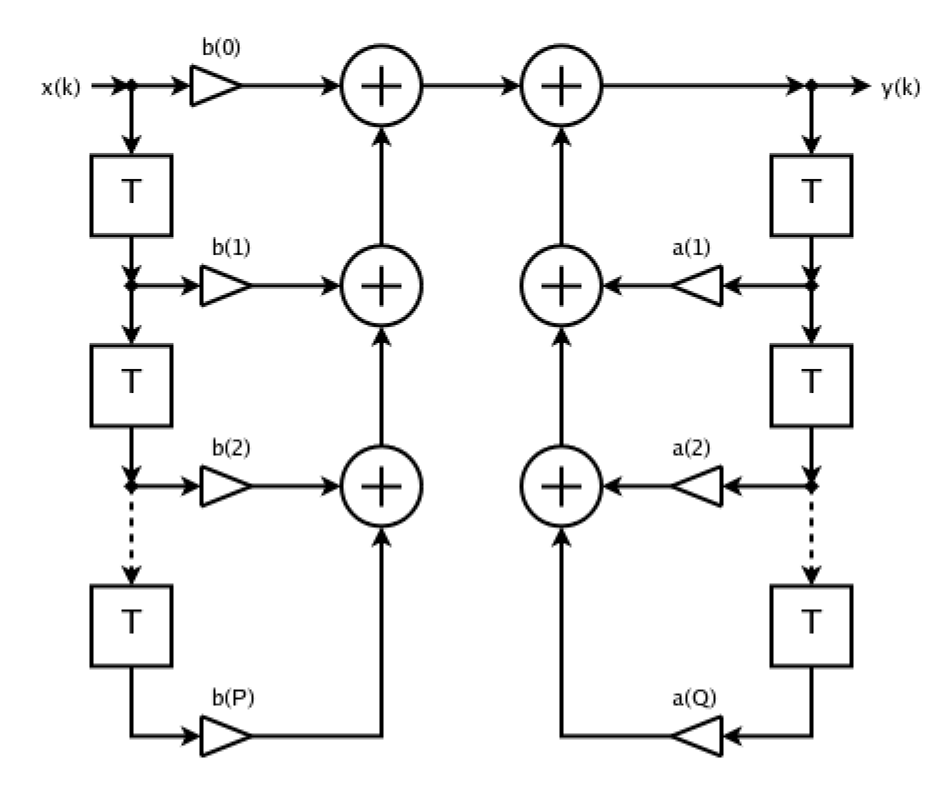
$$\sigma \leq 0{,}5$$

Existen muchas otras ventanas, y cada una poses sus características particulares. Si bien para el audio, a grandes rasgos, cualquiera puede ser de utilidad, para realizar mediciones que precisan de gran exactitud, no dará lo mismo cualquier elección. La ventana de Hamming posee buena resolución tanto en frecuencia como en amplitud (aunque a bajas amplitudes puede dificultarse su interpretación en aplicaciones de audio). La ventana de Blackman posee buena resolución en frecuencia, pero regular resolución en amplitud, y se la suele utilizar para medir distorsiones.

- **Muestreo en frecuencia**.
- **Rizado constante** (Aproximación de Chebyshev y algoritmo de intercambio de Remez).
- **Mínimos Cuadrados**
- **Método Parks-McClellan**

IIR es una sigla en inglés para Infinite Impulse Response o Respuesta infinita al impulso. Se trata de un tipo de filtros digitales en el que, como su nombre indica, si la entrada es una señal impulso, la salida tendrá un número infinito de términos no nulos, es decir, nunca vuelve al reposo.

Hay numerosas formas de implementar los filtros IIR. La estructura afecta a las características finales que presentará el filtro como la estabilidad. Otros parámetros a tener en cuenta a la hora de elegir una estructura es el gasto computacional que presenta.



Este tipo de filtros presenta polos y ceros que determina la estabilidad y la causalidad del sistema.

Cuando todos los ceros y polos están en el interior de la circunferencia unidad se dice que es fase mínima y el sistema es estable y causal. Si todos los ceros están en el exterior es fase máxima.

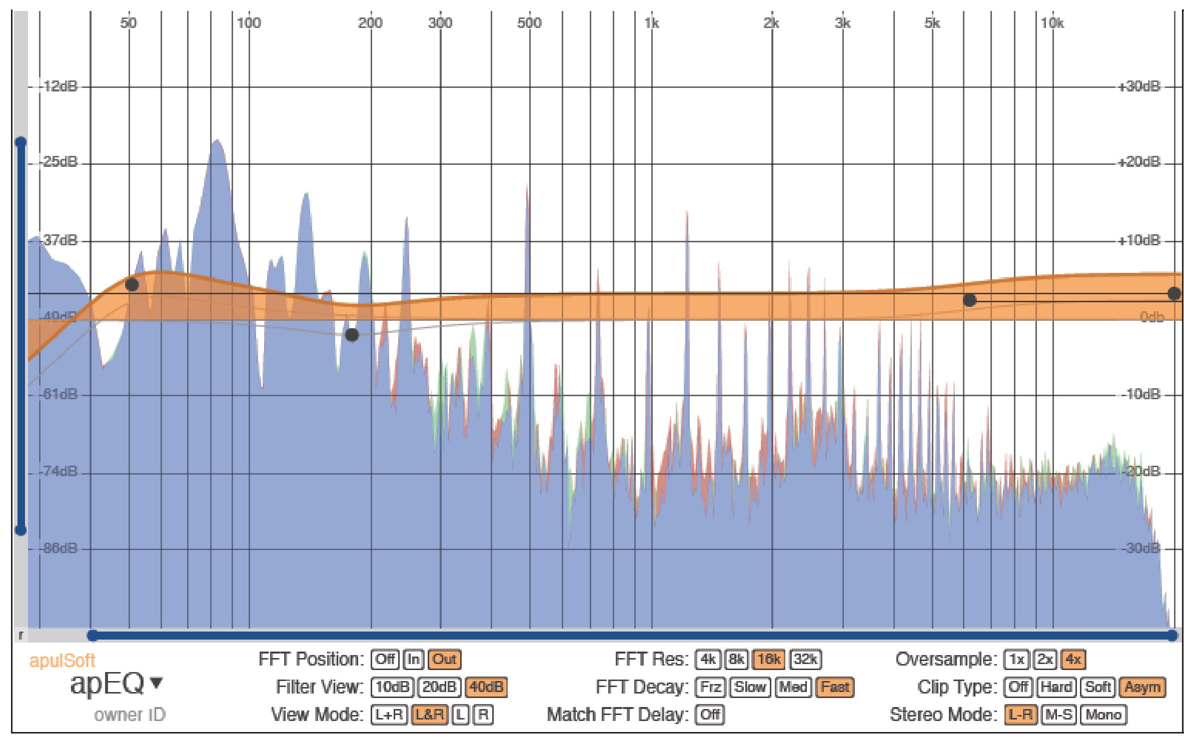
Si algún polo está fuera de la circunferencia unidad el sistema es inestable.

EJEMPLOS CONCRETOS DE EQ Digitales

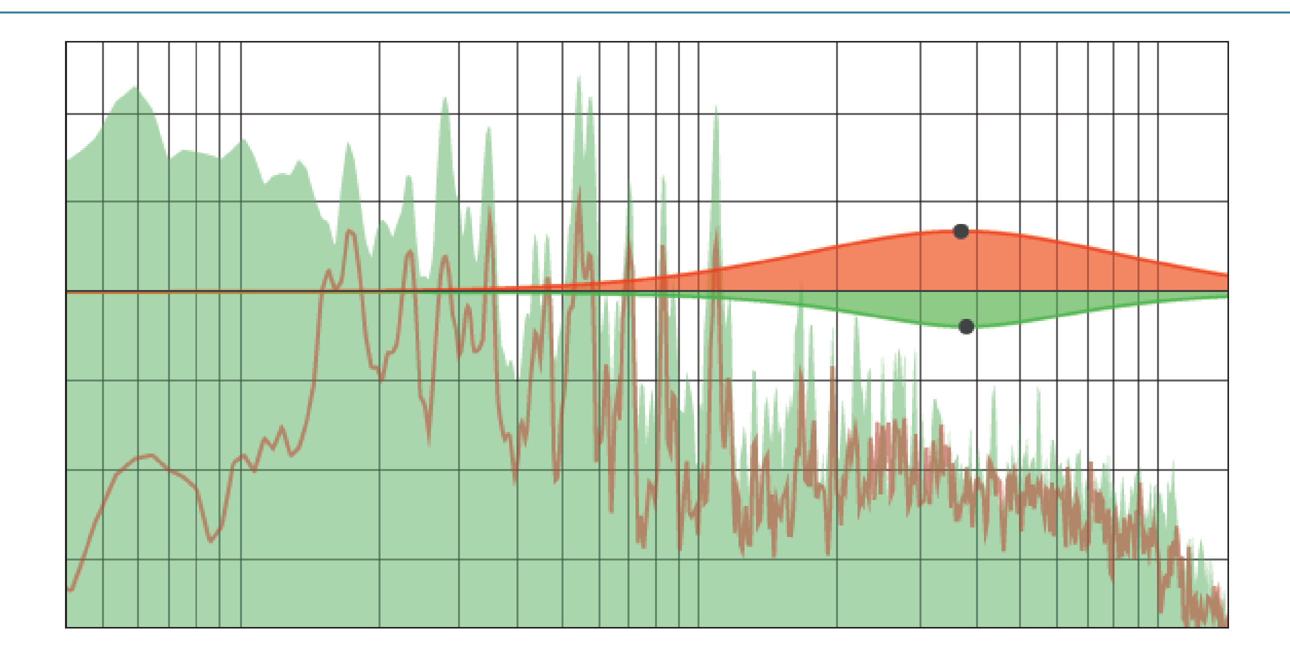
ApEQ

Uno de los mejores ecualizadores del marcado con compatibilidad VST es apEQ

Su principal fuerte es que es de **fase lineal** y trabaja con **64 bit** de proceso interno. Además de ser bastante liviano comparado con otros ecualizadores de fase lineal y con una interfaz amigable.



Tiene un analizador FFT en tiempo real y permite una lectura de la sumatoria mono, los dos canales separados, solo canal izquierdo, o solo canal derecho



Sus principales características son:

- Precisión interna a 64 bit
- 2x y 4x de sobre muestreo
- Recorte “duro” (hard) y “suave” (soft) a la salida
- Número variable de bandas de filtro, hasta 64
- Hasta 40dB de ganancia por cada banda de filtro
- Filtrado estéreo independientes
- Analizador FFT de alta resolución con zoom
- Visualización del analizador grande
- Edición gráfica de los filtros en la parte superior de la pantalla del analizador.

Mackie QuadEQ 4-Channel Digital Graphic Equalizer





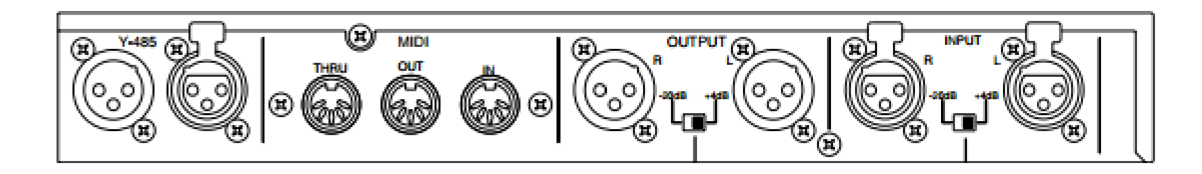
- 4 canales de 30 bandas digitales
- Filtros Pasa Bajos y Pasa Altos variables en cada canal
- RTA (Real Time Analyzer)
- Simultáneamente: EQ y RTA
- Medición ponderada en dB-SPL A, B y C
- Generador de ruido roza
- 99 memorias para almacenar ajustes
- Visualización estéreo de los canales A, B, C, y D
- Intuitivo y fácil de usar
- Conexiones de entrada y salida: XLR y TRS
- Principal uso: Música en vivo, espectáculos

Yamaha YDG2030 Digital Graphic Equalizer





Ecualizador digital de 30 bandas



Las especificaciones técnicas se pueden ver en el manual oficial:
http://www2.yamaha.co.jp/manual/pdf/pa/english/signal/YDG2030E.pdf

Bibliografía

- **Acústica y Sistemas de Sonido - Federico Miyara (Capítulo 11 - Filtros y ecualizadores) ISBN: 978-950-673-557-9**

- **Adaptive Digital Filters Second Edition, Revised and Expanded - Maurice G. Bellanger Paris, France ISBN: 0-8247-0563-7**

- **apulSoft apEQ v1.3.0 Manual**

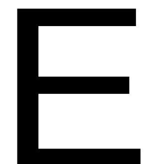
- **El Mal Hábito de lo Gráfico – Salvador Castañeda Valdés www.sonotribe.com**

- **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing By Steven W. Smith - CH14 Introduction to Digital Filters**

- **Practica Filtro Digital en LabVIEW - Prof Lucelly Reyes H**

- **John G. Proakis & Dimitris G. Manolakis - Digital signal processing - Principles algorithms and applications ISBN 0-13-394338-9**

COMPRESORES DIGITALES


n este capítulo hablaremos sobre compresores, de rango dinámico, digitales.

Ahora nos referiremos a un tipo de procesadores de señal que actúan modificando el rango dinámico de la señal. Recordemos que el rango dinámico es la diferencia en dB entre el máximo nivel y el mínimo nivel de una señal. Hay varias situaciones en las que es necesario reducir el rango dinámico, siendo probablemente la más representativa aquélla en que la señal debe atravesar otro procesador cuya relación señal/ruido es menor que el rango dinámico original.

En producciones musicales, el compresor es realmente una herramienta multifuncional. Se puede utilizar para cambiar la distancia percibida de un instrumento en la mezcla, haciendo que parezca más cercano o más distante. A diferencia de, por ejemplo EQ o Delay, el efecto que tiene la compresión en una señal es a menudo bastante sutil. Esto hace que sea una herramienta más difícil de entender y dominar.

El nivel RMS (Root Mean Square) corresponde al valor cuadrático medio, el cual es una medida estadística. Hay dos formas de calcularlo, tanto para valores discretos como para una función de variable continua:

- RMS para N valores:

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_N^2}{N}}$$

- RMS para una función continua f(t), para el intervalo [T1, T2]:

$$_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1}\int_{T_1}^{T_2} [f(t)]^2 \, dt}$$

Cuanto mayor sea el intervalo de integración, más lento fluctuará el valor RMS y viceversa.

Es de gran utilidad contar con ambos medidores en forma conjunta, ya que nos darán una visión global tanto de los picos máximos como de amplitud y su verdadera intensidad sonora. La falta de dinámica es claramente delatada cuando los valores de RMS no difieren mucho de los de pico.

Dentro del campo digital existen medidores de **rango dinámico** (como el "TT Dynamic Range Meter" de "Dynamic Range Foundation"). O bien, un uso práctico es el vúmetro en RMS. En el campo analógico, donde las señales son mensuradas como niveles de voltaje, si por ejemplo disponemos de una señal cuyos valores máximo y mínimo son, respectivamente, **22 V** y **0,2 mV**.:

$$N_{\text{señal máx}} = 20 \log_{10} \frac{22\ V}{1\ V} = 27\ dBV$$

$$N_{\text{señal mín}} = 20 \log_{10} \frac{0{,}0002\ V}{1\ V} = -74\ dBV$$

lo cual implica un **rango dinámico** de

27 - (-74) = **101 dB**.

*La **Envolvente Dinámica** es la evolución temporal relativamente lenta de la intensidad sonora de un evento. Por ejemplo, para un golpe de tambor como el de la figura A, le corresponderá la envolvente de la figura B*

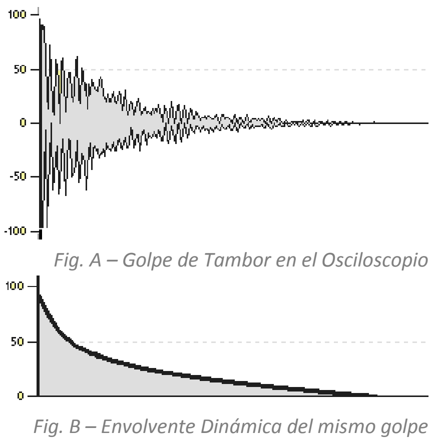


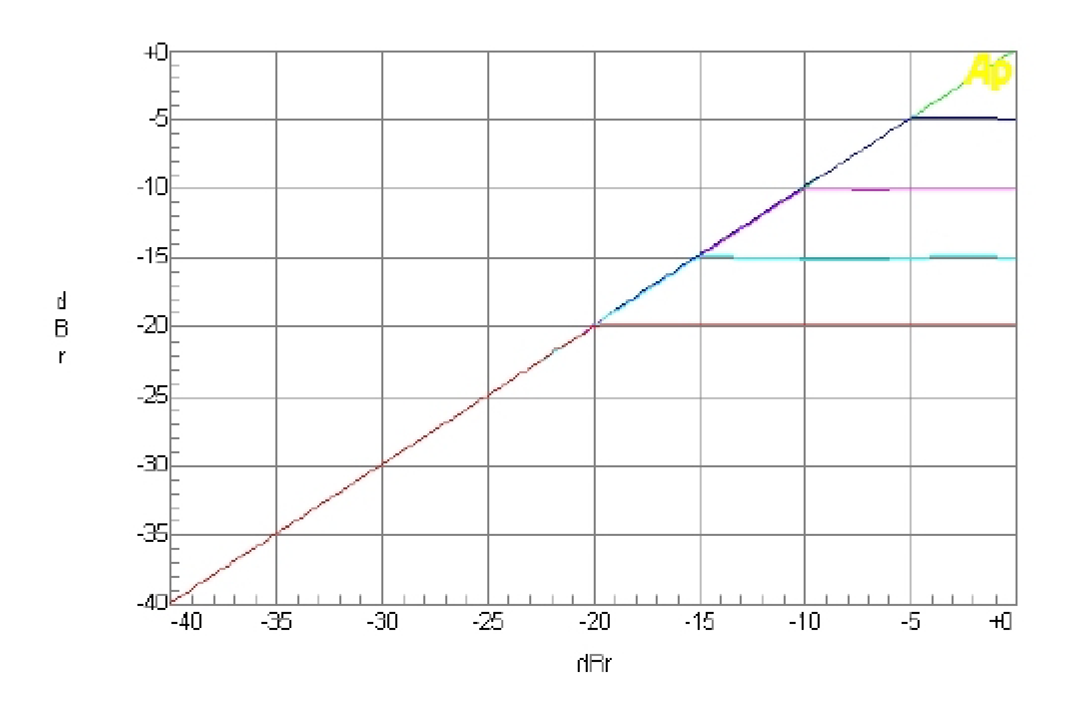
Fig. A – Golpe de Tambor en el Osciloscopio

Fig. B – Envolvente Dinámica del mismo golpe

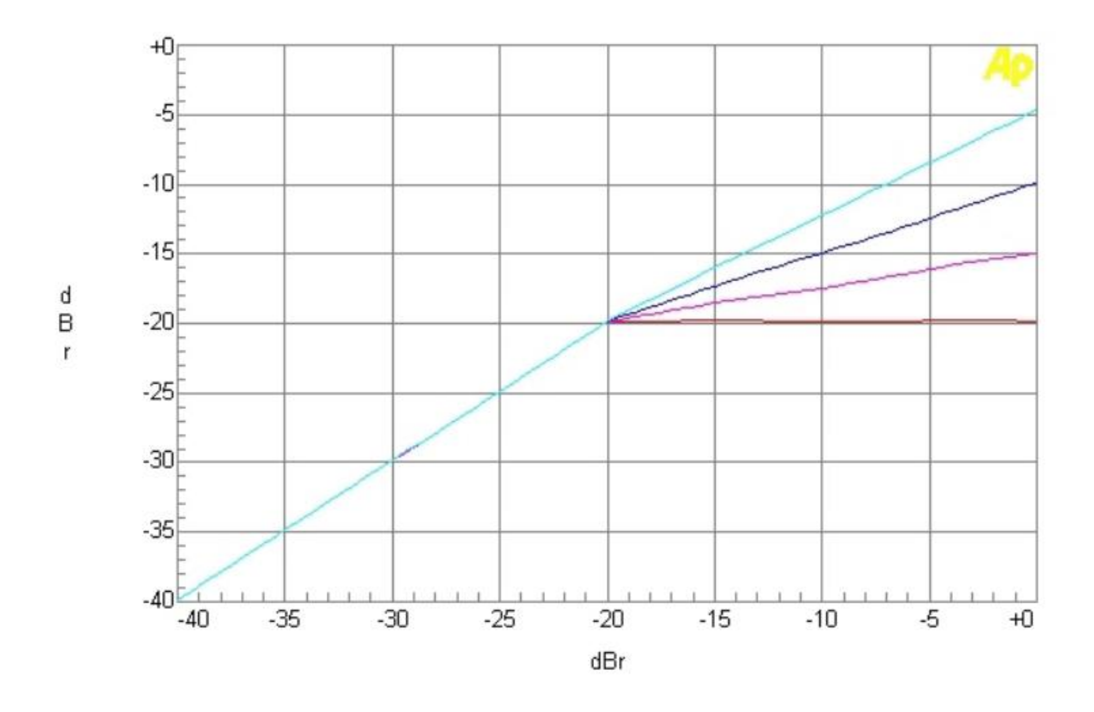
Elementos de los Compresores Digitales

- **Ganancia**: La ganancia es la relación entre una variable de entrada y una variable de salida de un cierto dispositivo. En el caso de un amplificador, la ganancia G es la relación entre la tensión de salida sobre la de entrada $(G = \frac{v_{salida}}{v_{entrada}})$ donde si ambas son iguales, G=1, si la tensión de salida es el doble de la de entrada G=2, si la tensión de salida es la mitad de la de entrada G=1/2, etc

- **Umbral**: El umbral es nivel mínimo de señal donde el compresor comenzará a modificar la forma de onda. Si el detector de nivel percibe señales por debajo de este umbral, el controlador de ganancia tendrá G=1, y la señal no se modificará. Si la señal supera el umbral, la señal se verá modificada en su rango dinámico (dependiendo de la relación de compresión seleccionada).



- **Ratio** (Factor de Compresión): El control de razón/factor de compresión establece la tasa a la que se producirá la reducción de ganancia cuando el nivel de entrada trasciende el nivel de umbral establecido. Si por ejemplo elegimos un factor de 3:1, una señal que sobrepase 9dB al umbral, luego de ser comprimida lo superará ahora en 3dB. En 2:1, la misma señal lo superará en 4,5dB



Tiempo de Ataque y Tiempo de Relevo

El **tiempo de ataque** es el tiempo que toma el compresor en aplicar la relación de compresión efectivamente, una vez cruzado el nivel del umbral. Este parámetro es ajustable, y permite dejar pasar las señales transientes y picos iniciales, hasta que se complete el tiempo de ataque seleccionado. Este tiempo puede ser muy corto, incluso casi nulo, pero esto puede implicar altos niveles de distorsión si es que el detector de nivel no reconoce al menos un ciclo de la señal entrante. El tiempo de ataque además tiene una estrecha relación con el timbre de la señal a comprimir. Imaginemos el sonido de un piano, donde no tuviésemos un ataque definido, debido a un ajuste de tiempo de ataque muy corto: se perderá el sonido percutido sobre la cuerda que define el timbre característico del instrumento. Es por ello que los transientes muchas veces no deben ser omitidos, si es que se pretende mantener el timbre del la señal lo más intacto posible.

El otro modificador de la envolvente de acción del compresor es el **tiempo de relevo** (en inglés, release), el cual requiere un especial cuidado dependiendo del tipo de señales a manejar. Este parámetro controla el tiempo en el cual el compresor, luego de actuar, vuelve a su estado de ganancia inicial. La curva de la envolvente depende del tipo de compresor, donde puede ser lineal, exponencial, logarítmica, etc., y la sonoridad que provea el compresor “bombeando” las señales una vez que estén por debajo del umbral, dependerá de esta curva, y obviamente del tiempo ajustado. Es importante remarcar el bombeo, ya que muchas veces para determinadas señales, un release muy largo hará una caída de la señal antinatural, y uno muy corto producirá una reducción del nivel (y aportará también distorsión) de las frecuencias que su período sea mayor que dicho tiempo.

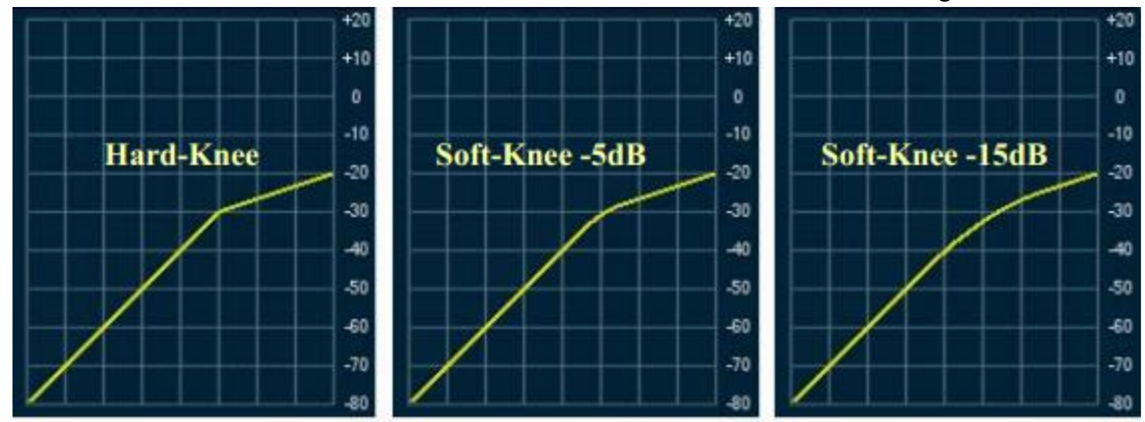


Fig. 5 – Señal original



Fig. 6 – Señal comprimida

- **Knee**: El punto de cruce del umbral del compresor es conocido también como "codo" (en inglés, knee). Una forma de lograr compresiones que suenen más naturales y menos rudas es evitando cambios abruptos de la dinámica, pero en forma inversa al del agregado de tiempo de ataque. Esta estrategia consiste en el llamado soft-knee, donde la reducción de ganancia comienza antes del umbral, en forma moderada, y recién se vuelve efectivo el ratio un tanto después de cruzado dicho punto. Es por ello que el ataque en estos casos no tendrá sentido, ya que se busca el efecto contrario. En estos casos, las envolventes resultantes suelen ser bastante graduales.



Compresor con umbral -30dB y ratio 3:1, con hard-knee y soft-knee

- **Side-Chain**: Hay formas de "tomar control" del compresor, y que este actúe no necesariamente cuando la señal atraviese el umbral, sino cuando determinada banda de frecuencias sintonizada a nuestro criterio lo haga. El Side-Chain ("cadena lateral") es una herramienta muy útil, ya que permite tomar como señal de disparo (trigger) sólo una porción del espectro de la señal original, o incluso otra señal externa. Esto es muy útil, por ejemplo, cuando se utiliza como señal de disparo una voz y cada vez que esta excede cierto umbral, se comprime o disminuye la música de fondo.

- **Comportamiento Opto/Electro**: Es común ver este tipo de selectores de comportamiento en muchos compresores digitales. La palabra Opto proviene de "óptica", dado que los Opto Compresores analógicos utilizan una foto célula o una fotorresistencia para controlar la reducción de la ganancia, combinada con algún dispositivo que emita luz, y cuya intensidad siga el mismo patrón de variación que el de la señal entrante.

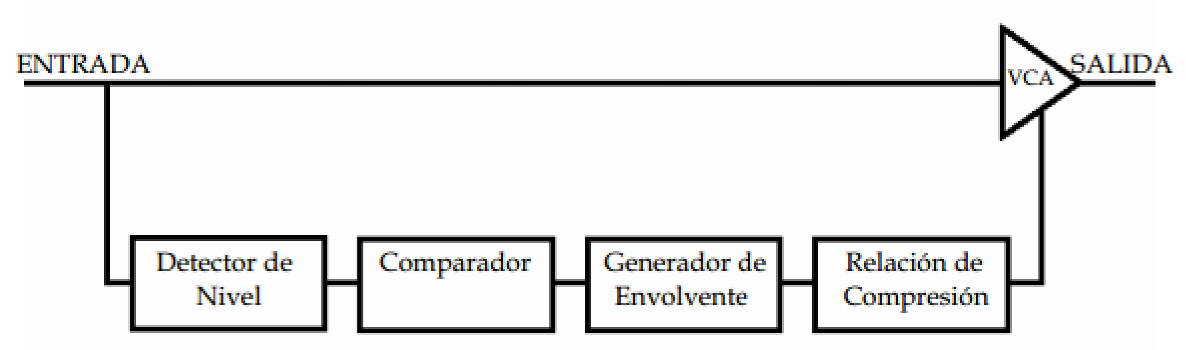
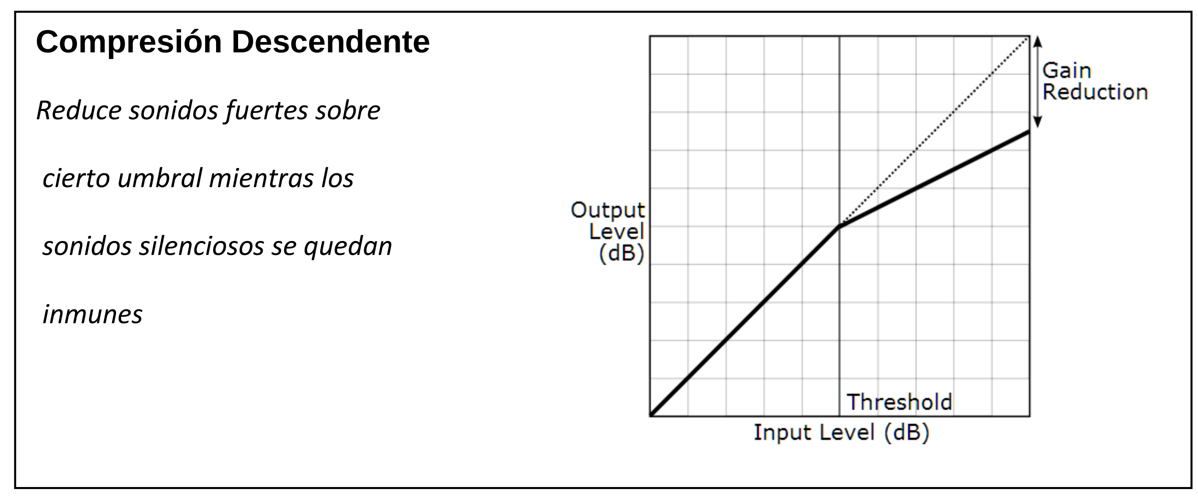


Fig. 1 – Diagrama de bloques de un compresor estándar

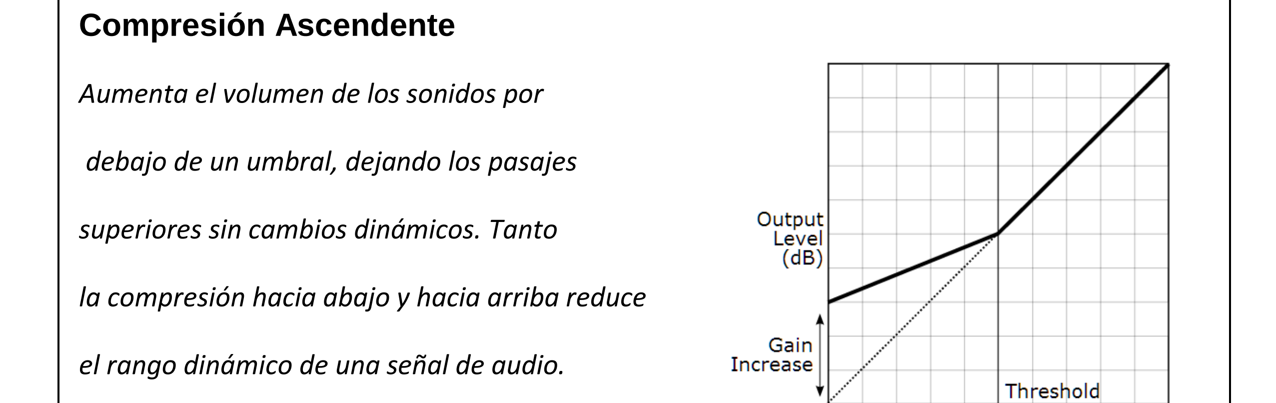
Métodos de reducción de Rango Dinámico

A grandes rasgos, podríamos decir que hay dos formas de trabajar con la compresión.



Compresión Descendente

Reduce sonidos fuertes sobre cierto umbral mientras los sonidos silenciosos se quedan inmunes



Compresión Ascendente

Aumenta el volumen de los sonidos por debajo de un umbral, dejando los pasajes superiores sin cambios dinámicos. Tanto la compresión hacia abajo y hacia arriba reduce el rango dinámico de una señal de audio.

Bibliografía

- **Acústica y Sistemas de Sonido - Federico Miyara (Capítulo 13 – Compresores y Limitadores) ISBN: 978-950-673-557-9**

- **Sonnox Oxford Dynamics Operation Manual – Versión 1.1 (9 de Enero del 2012)**

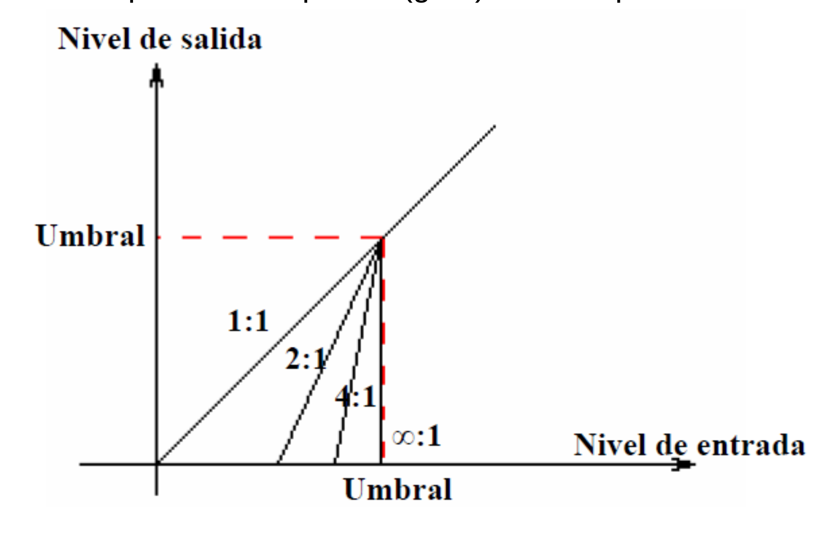
- **ReaMix: Breaking the Barriers with REAPER - Geoffrey Francis – Capitulo 3.8.1 Compression (página 90)**

Expansores Dinámicos Digitales

El expansor es un procesador de dinámica del audio (también usado como filtro de grabaciones profesionales). Hace el proceso inverso de un compresor, ya que aumenta el rango dinámico de la señal de audio. Sus controles son similares al del compresor (dependiendo marca y modelo):

- Ganancia
- Umbral
- Tiempo de Ataque
- Tiempo de Release
- Hold
- Ratio (Factor de compresión)
- Range

Para aquellos valores de la señal que estén por debajo del umbral, a su diferencia con éste se la multiplicará por el radio de expansión, donde por ejemplo si una señal es 5dB inferior al treshold seleccionado, si el ratio está ajustado en 3:1, la disminución será tal que la señal ahora estará a 15dB del umbral. No está de más aclarar que una compuerta (gate) es un expansor con radio infinito.



Bibliografía

- Sonnox Oxford Dynamics – Operation Manual – version 1.1

Limitadores Digitales

Un Limitador es un compresor con una razón de compresión infinita. Están los hard-limiter (limitadores duros, en inglés), que recortan agresivamente la amplitud al superar cierto umbral, dando como resultado un sonido poco agradable. Pero generalmente, los limitadores trabajan reduciendo la ganancia de manera de llevar el nivel de señal a un valor constante, igual al umbral. Si bien la onda no se distorsiona, si se produce una distorsión en las relaciones dinámicas de la música. Restringiendo, una vez superado el umbral, las posibilidades expresivas.

El tiempo de ataque juega un rol significativo en el funcionamiento de este proceso, ya que implica la velocidad con la que actuará el limitador.

Un ejemplo de su uso, es en las emisoras de frecuencia modulada (**FM**), en las cuales por ley está prohibido enviar al aire frecuencias más allá de ± 75 kHz de la frecuencia de la emisora. Como en **FM** la amplitud se codifica como desviación de frecuencia, una mayor amplitud implica una mayor desviación de frecuencia, con el peligro de invadir la banda asignada a la emisora vecina en el dial. En este caso, el limitador actúa como recurso extremo para no entrar en la ilegalidad.



Bibliografía

- **Federico Miyara, Acústica y Sistemas de Sonido**
- **Sonnox Oxford Limiter Manual**

Procesadores Digitales

Introducción

Un procesador digital de señales o DSP es un sistema basado en un procesador o microprocesador que posee un conjunto de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesado y representación de señales analógicas en tiempo real: en un sistema que trabaje de esta forma (tiempo real) se reciben muestras (samples en inglés), normalmente provenientes de un conversor analógico/digital (ADC). Habitualmente se define la señal de entrada $x[n]$ como la que se quiere procesar, la señal de salida $y[n]$ como la señal procesada y una regla para obtener la salida como función de la entrada.

Generalmente cuando nos referimos a procesadores de audio, se engloba: **ecualizadores**, **compresores**, **expansores**, **limitadores** y **compuertas**.

Si tomamos como muestras de una señal digital $x[n] = ..., 1, 3, 2, 6, 5, 2, 1, ...$ y como regla de procesamiento la que toma la media del número anterior $x[n-1]$, el número actual $x[n]$ y el número siguiente $x[n+1]$ y lo sustituimos en la posición actual de salida $y[n]$, obtendremos para la señal del ejemplo la salida del procesamiento siguiente:

$$y[n] = ..., 1/3, 4/3, 2, 11/3, 13/3, 13/3, 8/3, 1, 1/3, ...$$

A continuación citaremos algunos ejemplos de procesadores que están actualmente en el mercado

PROCESADOR DE AUDIO DIGITAL – DAS



El DSP-26 de D.A.S. es un procesador digital para sistemas de altavoces que realiza las funciones de crossover analógico, ecualizador, limitador y unidad de retardo. Diseñado para su aplicación como distribuidor de zonas en instalaciones fijas, sistemas de P.A. y para monitoraje de escenario, el DSP-26 se caracteriza por tener dos entradas analógicas balanceadas y seis salidas balanceadas utilizando conectores XLR. ESPECIFICACIONES Modos de Operación Configurable hasta 6-vías Tipo Configurable Mono/Stereo Tipo de Filtro Bessel, Butterworth, Linkwitz-Riley Frecuencias de Cruce Variable

ESPECIFICACIONES

Modos de Operación Configurable hasta 6-vías

Tipo Configurable Mono/Stereo

Tipo de Filtro Bessel, Butterworth,

Linkwitz-Riley

Frecuencias de Cruce Variable

Entradas 2

Salidas 6

Control de Ganancia de Salida +/-15 dB, en pasos de 0.1 dB

Limitadores Variable por vía

Tensión Nominal 90-250 VAC 50/60 Hz

Dimensiones (Al x An x P) 48.1 x 4.4 x 22.3 cm

19 x 3.5 x 8.8 in

Peso 3.6 kg (8 lb)

Behringer DCX-2496 ULTRADRIVER PRO





-3 entradas analógicas (una configurable como entrada estéreo digital AES/EBU) y 6 salidas analógicas para la máxima flexibilidad

-Convertidores A/D y D/A AKM® 24-bit/96 kHz aseguran la integridad de la señal y un elevado margen dinámico (113dB)

-Convertidor de tiempo de muestreo integrado para facilitar la conexión con señales externas desde 32 a 96kHz

-Precisos ecualizadores dinámicos para ecualización dependiente del nivel de señal y ecualizadores paramétricos extremadamente musicales asignables a todas las entradas y salidas

-Diferentes tipos de ecualización (paso altos, bajos, paso banda) para cada entrada y salida

-Limitadores con tiempo de ataque "cero" para protección optima de los altavoces

-Cuatro modos de operación mono y estéreo diferentes

-Crossover individuales (Butterworth, Bessel y Linkwitz-Riley) con pendiente ajustable desde 6 a 48 dB/octava

-Retardos ajustables en todas las entradas y salidas, permitiendo corrección automática o manual en función de la temperatura de la sala, fase y tiempos de llegada

-Señal suma adicional derivada desde las entradas A/B/C añade una cuarta señal de entrada interna

-Software a toda prueba que permite control remoto simple o múltiple desde PC mediante conexión RS-232 y RS-485 (www.behringer.com)

-Opción "link" vía RS-485 para conectar en cascada varias unidades ULTRADRIVE PRO

-60 bancos de memoria internos definidos por el usuario almacenables mediante software de PC o en tarjeta PCMCIA

-Arquitectura abierta que permite fácil actualización del software

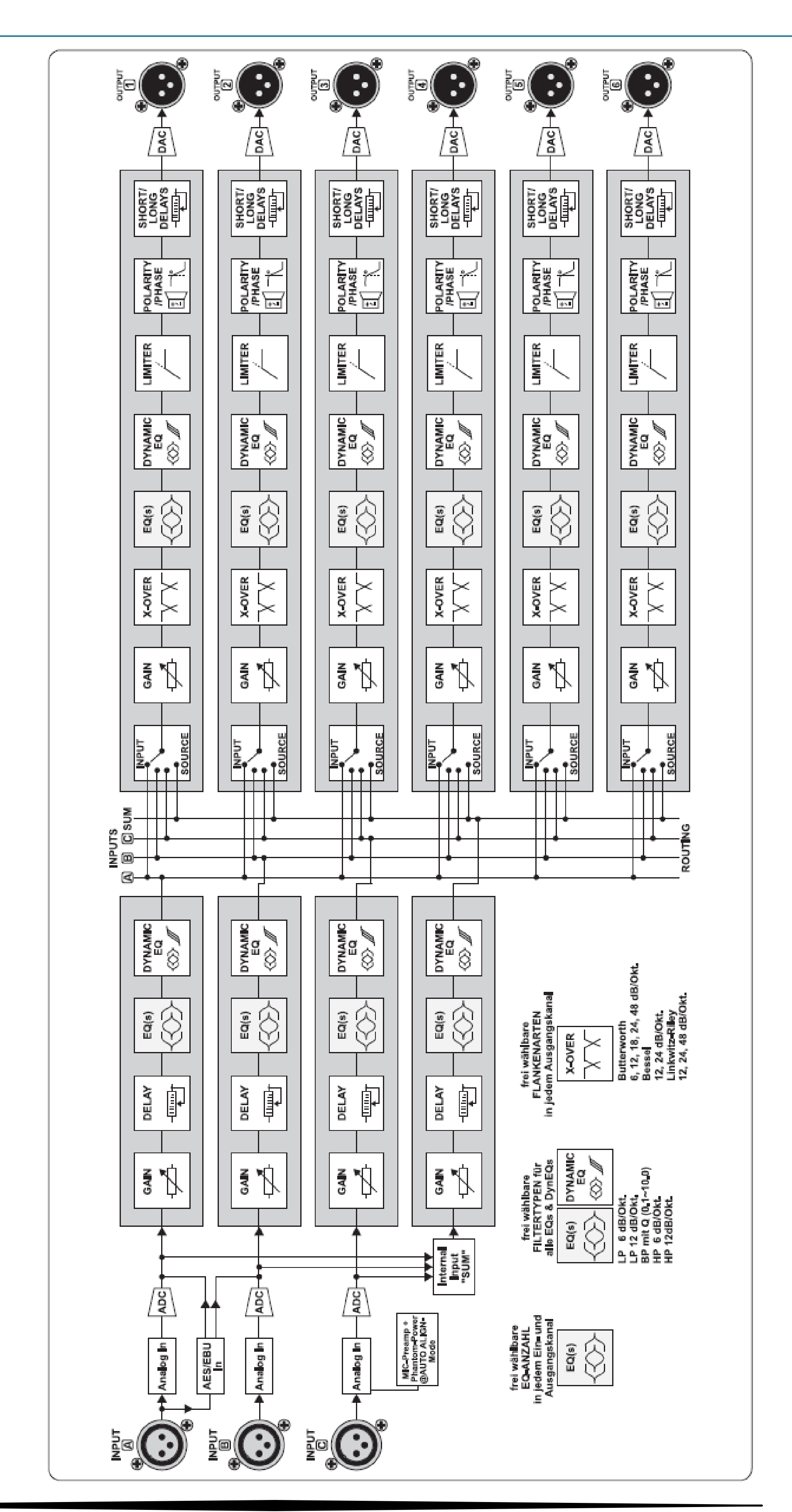
-Amplificadores operacionales 4580 para la mayor calidad de audio

-Circuitos servo balanceados y conectores XLR bañados en oro en todas las entradas y salidas

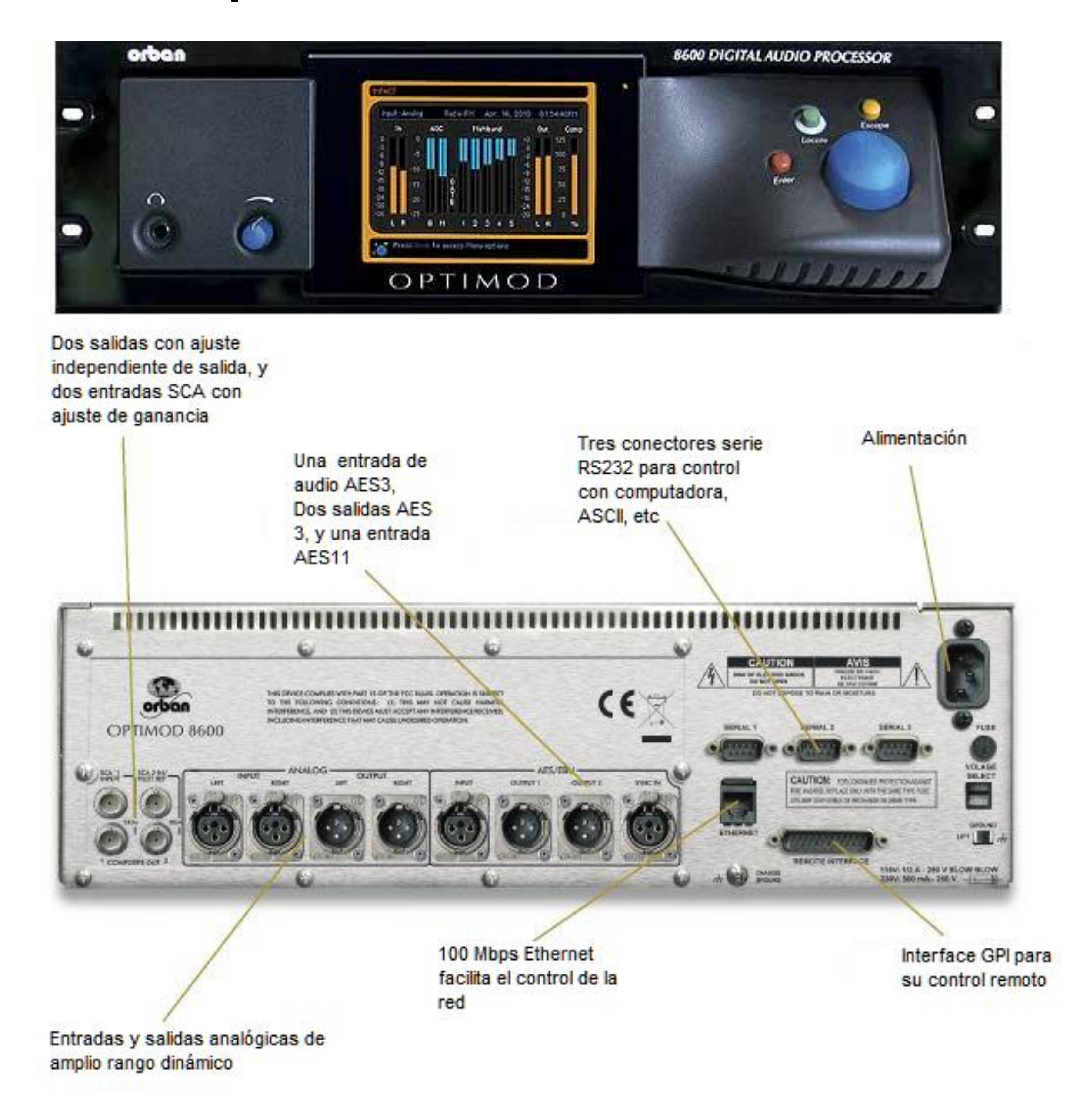
-Componentes de alta calidad y construcción excepcionalmente robusta garantizan una larga vida útil

-Fuente de alimentación interna conmutada universal (100 - 240V~) para la mayor flexibilidad, audio libre de ruido, excelente respuesta transitoria y consumo reducido

DIAGRAMA EN BLOQUES:



Orban Optimod-FM 8600



Es uno de los más completos procesadores destinados para la transmisión de radio.

Las características se pueden consultar en:
http://www.orban.com/products/radio/fm/8600/features/

Bibliografía

- **Procesador DAS: http://www.citysound.net/es/dsp-26-procesador-de-audio-digital-das/pid3771#Caracteristicas**

- **Behringer DCX-2496: http://www.audiotecnicarosario.com/productos/Behringer/607-DCX.2496_ULTRADRIVER_PRO.html**

- **Orban: http://www.orban.com/products/radio/fm/8600/**

Compresión de Datos

Es la reducción de la información digital que es necesario almacenar respecto a su versión original, de manera de ahorrar espacio de almacenamiento. En general se basa en aprovechar algunas características de la señal a almacenar (por ejemplo, eliminar componentes del sonido inaudibles por enmascaramiento).

La compresión de datos consiste en aprovechar ciertas características de la señal a codificar de modo que se requiera una menor cantidad de símbolos para representarla. En computación, por ejemplo, se sabe que los archivos frecuentemente contienen ráfagas de varios bytes seguidos idénticos. Entonces, si en lugar de almacenarlos a todos se almacena sólo el valor del primer byte y luego la cantidad de bytes iguales a aquél que lo siguen, se obtendrá un primer ejemplo de compresión de datos. En el caso de las señales de audio no es común que se repitan datos (salvo quizás en los pasajes de silencio, en los cuales las muestras deberían ser todas 0), de modo que ese tipo de algoritmo de compresión no sería aplicable en este caso. Sin embargo se da otro hecho muy interesante, y es que debido al fenómeno de enmascaramiento la señal de audio suele contener más frecuencias que las que en efecto puede llegar a escuchar el oído humano.

La codificación PASC (codificación de precisión adaptable por subbandas, del inglés “Precision Adaptive Sub-band Coding”) se propone descartar dicha información inaudible, y aprovechar el espacio ganado para incorporar otra información más pertinente. Para ello se divide primero todo el rango de frecuencias audibles en 32 subbandas de igual extensión, para lo cual se utiliza un banco de filtros digitales de reconstrucción perfecta, vale decir que por medio de un banco de filtros complementario se obtiene una reproducción exacta de la señal original. A continuación, se toma cada subbanda y se determina si, en función del nivel de las componentes sonoras en las subbandas vecinas, la señal presente en la misma se percibirá o no. Para ello se recurre a las curvas de enmascaramiento Así, por ejemplo, si en la subbanda 19 hay un tono débil, dependiendo de qué haya en las subbandas 18 y 20 (y otras más alejadas), dicho tono podrá o no percibirse. Si en alguna de dichas subbandas hay un tono de gran amplitud, el tono de la subbanda 19 no se percibirá, y por lo tanto puede eliminarse del código permitiendo ahorrar espacio.

La codificación PASC posee otra propiedad interesante, y es el hecho de que su precisión es adaptable. Esto significa que la precisión con que se representan las muestras dentro de cada subbanda (es decir el número de bits) se va adaptando o

ajustando según los niveles de la señal y del umbral que en ese momento hay en la subbanda.

Para comprender mejor este concepto veamos unos ejemplos. Supongamos que en cierta subbanda el umbral absoluto (en ausencia de otros sonidos enmascarantes) es de 20 dB, lo cual significa que cualquier ruido de menos de 20 dB dentro de esa subbanda será inaudible. Si ahora aparece en la subbanda una señal de 70 dB, dado que puede tolerarse sin inconvenientes un ruido de hasta 20 dB, resulta que se puede admitir una relación señal/ruido tan baja como

$$\mathbf{70\ dB - 20\ dB = 50\ dB}$$

Una señal con esta relación señal/ruido puede representarse perfectamente con 9 bits, ya que, como se recordará del capítulo 15, la relación señal/ruido de una señal digitalizada aumenta 6 dB por cada bit, de donde

$$\mathbf{S / R_{9\ bits} = 9 \times 6 = 54\ dB}$$

que es mayor que el mínimo de 50 dB. Cualquier bit adicional proporcionará información que no puede escucharse debido a que cae por debajo del umbral. Ahora, si como consecuencia de la aparición de sonidos en otras bandas vecinas el umbral se incrementa a 40 dB, la nueva relación señal/ruido admisible es

$$\mathbf{70\ dB - 40\ dB = 30\ dB}$$

que puede representarse con sólo 6 bits, ya que

$$\mathbf{S / R_{6\ bits} = 6 \times 6 = 36\ dB}$$

Si en estas nuevas condiciones (umbral de 40 dB) la señal se reduce a sólo 60 dB, un cálculo similar muestra que son suficientes sólo 4 bits para su correcta representación. El ejemplo anterior muestra que la precisión requerida en cada banda puede ir variando a lo largo del tiempo a medida que varía la relación entre el nivel de la señal y el umbral. Sin embargo, esta variación implica también que va variando el peso que se le asigna a un bit, por lo tanto hace falta acompañar los 4, 6 ó 9 bits de la representación anterior con algunos bits adicionales que permitan representar dicho peso. En apariencia, esto contrarresta el ahorro de bits, ya que si se utilizan menos bits para representar una misma señal (porque el umbral ha aumentado), cada bit debe tener mayor peso y por lo tanto se requieren más bits para representar ese peso. Para solucionar este inconveniente se recurre

al hecho de que el umbral no varía tan rápido como la señal, lo cual permite actualizar el valor del peso recién cada 12 muestras. Esta forma de representación se conoce como representación con coma flotante (floating point), y permite abarcar un mayor rango dinámico con menor cantidad de bits. La cifra que representa a la muestra, con una longitud de entre 0 y 15 bits, se denomina mantisa, y la que representa al peso (6 bits), factor de escala (o exponente).

El resultado de combinar la representación de coma flotante con el análisis de enmascaramiento es que para cada subbanda se requiere apenas la cuarta parte de los bits necesarios si no hubiera compresión. A esta altura cabe preguntarse cómo es que todo esto permite ahorrar bits en la representación total; porque si bien cada subbanda requiere, en promedio, la cuarta parte de los bits que requeriría sin tener en cuenta el enmascaramiento, de hecho tenemos... ¡32 bandas! Parecería que la cantidad total de bits es 32/4 = 8 veces mayor. Sin embargo, hay otro hecho que permite contrarrestar esto, y es que como cada banda tiene un ancho de banda 32 veces menor, requiere 32 veces menos muestras por segundo para satisfacer los requisitos del teorema de muestreo.

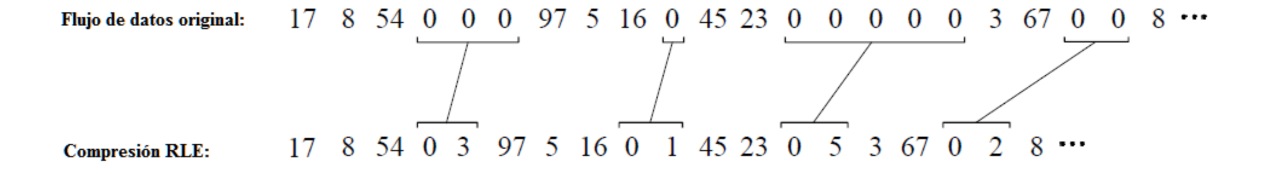
Resumiendo, la codificación PASC consigue una reducción en un factor 4 de la cantidad de bits requeridos para almacenar información de audio digital basándose en tres elementos:

1) Dividir en subbandas que requieren menor frecuencia de muestreo,

2) Aprovechar el hecho de que la precisión requerida para representar una muestra dentro de una subbanda se reduce cuando el umbral dentro de la subbanda aumenta por enmascaramiento, y

3) Utilizar una representación de coma flotante que permite un mayor rango dinámico con menor cantidad de bits.

Por otro lado, la compresión RLE o Run-length encoding es una forma muy simple de compresión de datos en la que secuencias de datos con el mismo valor consecutivas son almacenadas como un único valor más su recuento. Esto es más útil en datos que contienen muchas de estas "secuencias".



Bibliografía

- **Federico Miyara, Acústica y sistemas de Sonido**
- **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing - By Steven W. Smith, Ph.D. (Capítulo 27: Data Compression) Publication Date: 1997 | ISBN-10: 0966017633 | ISBN-13: 978-0966017632 | Edition: 1st http://www.dspguide.com/**

Radiodifusión Digital

Cuando hablamos de radio digital nos referimos a la radio tradicional, la nueva generación de radio por ondas electromagnéticas. La forma correcta sería decir **Radio Digital Terrestre**. No la confundamos con la Radio en Internet que, aunque también transmite en digital, no tiene que ver con este formato. En esta nueva fórmula de transmisión lo que cambia es el modo en que enviamos los contenidos, es decir, la señal moduladora. La portadora seguirá siendo una onda electromagnética de alta frecuencia, pero la información que lleve en su interior será digital. A partir de ahora, toda la información que recibirán nuestras audiencias será digital, independientemente del canal que usemos (ondas electromagnéticas, redes satelitales, cable, fibra óptica o Internet). En la nueva Radio Digital Terrestre la señal que sale de los estudios de radio y lleva la música y la voz estará convertida en 1 y 0. El formato va a depender del estándar que usemos en cada país, pero será audio comprimido de gran calidad. Es muy probable que el MPEG-4 (AAC) se termine imponiendo por su alta tasa de compresión. Ya no se modulará en frecuencia o amplitud, sino en nuevos sistemas digitales. El estándar europeo DAB, por ejemplo, usa el sistema de modulación COFDM (Múltiplex por división de frecuencias ortogonales). Estas modulaciones incorporan sistemas de corrección de errores con lo que está garantizada una óptima recepción de la señal. La señal de audio digital podrá ser, además, multiplexada. Podremos “montar” en la frecuencia de la portadora varias señales, es decir, varios canales cada uno con su programación independiente. El multicasting o transmisión múltiple de señales es una de las mayores ventajas frente a la transmisión analógica. Los canales de FM están separados entre sí por 200 Khz. Este ancho de banda permite enviar una sola señal analógica. Como los datos digitales ocupan menos espacio, por ese mismo ancho de banda enviaremos 3, 5, 9 o más señales, dependiendo del estándar elegido, la regulación de cada país y la calidad de la transmisión. Imaginemos que radio La Achirana, de Perú, ya transmite digitalmente en los 99.7 FM. Antes, solamente ofrecía una programación. Pero ahora, con el nuevo sistema digital, por el canal A de los 99.7 transmite noticias, por el B deportes y por el C programas juveniles.

Las emisoras podrán así multiplicar sus programaciones, claro está que sólo las que tengan recursos para pagar tanto equipo técnico y humano. Esto multiplicará también la competencia existente en el espectro radial y, como sólo las grandes radios aprovecharán el multicasting, los pequeños medios comunitarios y ciudadanos se verán más avasalladas.

Además del multicasting hay otras **ventajas que ofrece la transmisión digital**.

· **Calidad**: Es muy superior a los sistemas analógicos. El sonido de una FM se asemejará al de un CD y el de la AM y la Onda Corta a la actual FM. Además, se eliminarán las alteraciones de la señal y las interferencias, mejorando la calidad principalmente en los automóviles o cuando escuchamos la radio en movimiento.

· **Igual cobertura con menor potencia**: Lograremos la misma cobertura de la señal con menos watts digitales. Esto supondrá una pequeña reducción de los costos eléctricos.

· **Selección automática de frecuencia**: Para países que tienen circuitos nacionales de radio la transmisión digital constituirá una gran ventaja. Hasta ahora, cada zona de cobertura tiene una frecuencia diferente y al cambiar de ciudad a ciudad, como al viajar en auto, debes resintonizar para seguir escuchando la misma emisora. Con la radio digital el aparato lo hace sólo.

· **Servicios adicionales**: En la pantalla de los nuevos receptores digitales aparecerá información meteorológica, sobre tráfico, noticias de última hora, cotizaciones de bolsa... Se pueden difundir datos, habrá mayor interactividad y, sobre todo, más publicidad.

En televisión, la elección de los **estándares digitales** está muy avanzada. En cambio, en radio la cosa va más despacio y lo más probable es que algunos países no se decanten por sistemas digitales pensados exclusivamente para radio, sino que elijan estándares de televisión que permiten también la transmisión digital de radio.

ESTÁNDARES DE RADIODIFUSIÓN DIGITAL TERRESTRE



DAB - Digital Audio Broadcast (Radiodifusión de audio digital)

www.WorldDAB.org

Es el pionero de los estándares para la transmisión digital. Desarrollado en la década de los 80 en la Unión Europea, se le bautizó como EUREKA-147. En 1995, fue aprobado como el estándar para Europa. Prácticamente, todas las

grandes empresas radiofónicas del viejo continente tienen transmisiones simultáneas en analógico y digital. Canadá también adoptó el DAB.

La característica principal de este sistema, que pasa a ser también su mayor inconveniente, es que se utilizan frecuencias distintas a las actuales. Con la implementación del nuevo sistema, en Europa no se volverán a sintonizar radios en los antiguos diales de AM y FM. El nuevo rango de frecuencias es: 174 Mhz a los 240 Mhz (en banda III) y entre 1452 Mhz y 1492 Mhz (en banda L).

Frente a esta desventaja, el DAB supera a todos sus competidores en cuanto a calidad, ofreciendo mayor nitidez en la señal y más inmunidad a las interferencias. La última versión de este sistema es DAB+, que incorpora la codificación del audio en MPEG-4 (AAC) en vez de MP3, como en su primera versión. Esto supone mayor compresión de la señal con mejor calidad. Otra aplicación de la tecnología DAB es la DMB



(Digital Multimedia Broadcasting), sistema para transmitir video, audio y datos a teléfonos celulares.

HD Radio http://www.ibiquity.com/hdradio/

Usa la tecnología IBOC, In Band On Channel (en-banda, en-canal). Fue desarrollada en los Estados Unidos por el consorcio iBiquity y seleccionada por la FCC (Federal Communications Commission) como el estándar americano para radio digital. A pesar de tener calidad inferior al DAB, muchos apuestan por este estándar frente al europeo, ya que HD Radio transmite en la misma banda de frecuencias analógicas. La radio que se sintonice en el 92.9 Mhz del dial, seguirá en el mismo lugar después del apagón analógico. Además, durante la transición, las emisoras pueden funcionar en modo híbrido o simultáneo, difundiendo señales análogas y digitales dentro del mismo canal de la AM o de FM.



DRM (Digital Radio Mondiale) http://www.drm.org/

El sistema DRM permite que las radiodifusoras de AM, onda corta y onda larga se escuchen sin interferencias ni la molesta estática y sin que la señal vaya y venga constantemente. Con DRM el sonido será similar a la actual calidad de la FM. Al igual que en el sistema HD/IBOC, la DRM mantendrá las frecuencias actuales. Algunas emisoras que ya han incorporado la tecnología DRM son la Deutsche Welle (Alemania), BBC (Reino Unido), Radio Vaticano y Radio China Internacional.

Bibliografia

- **Santiago García Gago, Manual de Radialistas Analfatécnicos**

Radio Por Internet

Conocida como radio online o en línea. Aprovecha la tecnología streaming que permite ir escuchando el audio a medida que se va descargando. Han proliferado por miles en la Web, ya que no necesitan licencia y sus costos de funcionamiento son mínimos, hasta hay servicios gratuitos para poner una emisora en línea.

Semi-propietarias

Live365

Live365 ofrece a los newbies la posibilidad de un webcasting fácil e inmediato en formatos MP3 y MP3PRO.

SHOUTcast

Usuarios más tecnológicamente diestros pueden optar por el servicio SHOUTcast, usando su propio cliente Winamp y su propio plugin SHOUTcast DSP para la entrega de audio MP3 a bitrates más altos y, además, pudiéndose usar el códec AAC+.

SplitCast

Para usuarios que requieran crear un canal de transmisión de audio/video en Internet. A través de un reproductor personalizado, que los oyentes pueden descargar para conectarse al canal. Fácil configuración e instalación, soporta audiencias masivas en bitrates muy altos.

Abiertas

El uso de herramientas de software libre para streaming permite interesantes posibilidades de interfaz, tal como stream-db y php-stream.

Icecast

Icecast es un servidor de medios streaming con soporte para generar streams de Ogg Vorbis y MP3. Se le puede añadir soporte para formatos nuevos con relativa facilidad. Soporta estándares abiertos de comunicación e interacción. Está disponible para UNIX como a su vez para Microsoft Windows.

Interactivas

Desde 2003 ha aumentado el número de implementaciones de radio por Internet que permite a los usuarios valorar las canciones que están escuchando.